



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis Hidrogeoquímico Multivariado del Agua Subterránea del Sistema Acuífero del Valle Medio del Magdalena – Colombia

JUAN PABLO MALAGÓN NAVARRO

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Área Curricular de Ingeniería Civil y Agrícola
Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos
Bogotá D.C., Colombia

2017

Análisis Hidrogeoquímico-Multivariado del Agua Subterránea del Sistema Acuífero del Valle Medio del Magdalena – Colombia

Juan Pablo Malagón Navarro

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Director:

I.C., M.Sc., PhD. Leonardo David Donado Garzón

Codirectora:

I.C., M.Sc., Adriana Piña Fulano

Línea de Investigación:

Modelación de Fenómenos y Amenazas Naturales

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos – GIREH

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Área Curricular de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá D.C., Colombia

2017

Para quienes creyeron en mí...

Creo firmemente que el instante más sublime de un hombre, la consumación de su mayor anhelo, es el momento en el que ha entregado su alma y su corazón a una buena causa y yace en el terreno del juego... victorioso.

Vince Lombardi

Agradecimientos

Quiero manifestar mi completa gratitud a todas las personas que apoyaron la ejecución de este trabajo de grado;

En primera instancia doy gracias a DIOS porque solo él y su bendición permitieron la culminación de este estudio, especialmente en DIOS encontré las fuerzas necesarias, en los momentos más difíciles que atravesé para sortear la enfermedad psicosomática que padecí durante en desarrollo de esta investigación. En segundo lugar, plasmo palabras de gratitud a mi hermano gemelo CHALO, en momentos que necesite solo concentrarme en mis estudios, me apoyo en todo sentido, aprovecho para expresar mis mejores deseos en su nueva etapa de vida. A mi MADRE agradezco por su benevolencia, amor y cuidados, por otra parte, agradecer a mi PADRE por su ejemplo y en especial resaltar su cambio el cual beneficio mi concentración y permitió terminar de la mejor manera el desarrollo de este trabajo, a mi HERMANA-TUBER por sus reconocimientos y uno que otro necesario llamado de atención.

También agradezco a mis amigos de maestría Hernan, por su incondicionalidad a los Soterrados, en especial a Sofí y al profesor Leonardo Donado, por acompañar este proceso que, aunque ha sido largo (agosto de 2013), sin duda trascendió las barreras académicas. En última instancia, agradecer a Ktu quien apareció en mi vida como prueba que DIOS no juega a los dados, porque gracias a su bondad y constantes palabras de apoyo fue determinante en la feliz culminación de esta investigación.

Finalmente agradecer al geólogo Sebastián Arguello también a los que hicieron parte del programa nacional de semilleros de investigación, creación e innovación de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA 2013-2015 Código: 27661 quienes con su dedicación ayudaron al procesamiento de la información y creación del "HidroVisor ASVAMM", a su vez a COLCIENCIAS y UNIVERSIDAD NACIONAL por el programa

Jóvenes Investigadores e Innovadores No 617- Código: 21579, quien me otorgó una beca pasantía. También agradecemos a la Autoridad de Licencias ambientales (ANLA) y al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) por facilitar el acceso a la información que fue utilizada en esta investigación.

Resumen

Para identificar los principales procesos geoquímicos que determinan la composición química y la calidad del agua subterránea del Sistema Acuífero del Valle Medio del Magdalena - Colombia, se creó una base de datos con las caracterizaciones fisicoquímicas disponibles en las diferentes entidades gubernamentales y privadas ubicadas en el área de estudio. En total se recopilaron 2.207 caracterizaciones para el periodo comprendidos entre los años 2005 a 2014. Para este estudio se conservaron las muestras con un error analítico menor o igual al 10 %, correspondientes a 140 caracterizaciones. Se utilizaron métodos gráficos, hidroquímicos y estadísticos, para la comprensión de los procesos geoquímicos. De acuerdo con el análisis del diagrama de Piper se observó que el tipo de agua bicarbonatada cálcica es la facie hidrogeoquímica dominante a lo largo del área de estudio, seguidas por la del tipo bicarbonatada sódica y clorurada sódica. El estudio se complementó haciendo un análisis estadístico multivariado, incluyendo un Análisis de Componentes Principales (ACP) y Análisis de Agrupamiento Jerárquico (AAJ). Con el ACP, se determinaron tres componentes que representa el 59,4% de la variabilidad de los datos. La geología e hidrogeología del área de estudio se correlacionó con los resultados del ACP y se identificó que el primer componente está relacionado con la disolución de silicatos, el segundo con un posible proceso de óxido-reducción y el tercero asociado con procesos de contaminación antrópica. Seis grupos geoquímicamente distintos resultaron del AAJ, los cuales apoyaron los resultados del ACP respecto a los procesos geoquímicos identificados en el sistema acuífero del Valle Medio del Magdalena.

Palabras clave: Hidrogeoquímica, Análisis de Componentes Principales, Análisis de Agrupamiento Jerárquico, Agua Subterránea, Procesos Geoquímicos.

Abstract

The aim of this study was to identify the main geochemical processes that determine the chemistry composition and the quality of groundwater in the Middle Magdalena Valley Aquifer System – Colombia. Consequently, a database including the physicochemical characterization available in the different Government and private entities located in the study area was created. In total, 2.207 characterizations were collected for the period from 2005 to 2014. For this study, the samples with an ion- balance error less than or equal to 10% were kept, corresponding to 140 characterizations. Graphic, hydrochemical and statistics methods were used to understand the geochemical process. In agreement with the Piper diagram analysis, the Calcium Bicarbonate water type was the dominant facie through the study area, followed by the Sodium Bicarbonate and Sodium Chloride water types. The study was complemented performing a multivariate statistical analysis, counting a Principal Component Analysis (PCA) and Hierarchical Cluster Analysis (HCA). With the PCA, three main components that represent 59,4% of the data variability were determined. Geology and hydrogeology were correlated with the outcome of the PCA, and a relationship between the first component and the silicate dissolution, the second one and a possible oxidation-reduction process, and the third one with an anthropic pollution process were identified. Six clusters different geochemically resulted from the HCA. These clusters supported the PCA outcomes regarding to the geochemical processes identified in the Aquifer System of the Middle Magdalena Valley.

Keywords: Hydrogeochemical, Principal Component Analysis, Hierarchical Cluster Analysis, Geochemical processes.

Contenido

	Pág.
Introducción	1
1. Descripción del Área de Estudio.....	5
1.1.1 Descripción Hidrológica	5
1.1.2 Descripción Geológica	6
1.1.3 Descripción Hidrogeológica	14
2. Metodología	31
2.1 Selección y descripción de las muestras	31
2.1.1 HydroVisor ASVAMM	33
2.2 Análisis de Calidad de los datos.....	34
2.3 Análisis Estadístico Multivariado	35
2.4 Análisis Gráfico	36
3. Resultados y Discusión	43
3.1 Hidroquímica General del Agua Subterránea	43
3.2 Estadística Descriptiva	44
3.3 Análisis de Componentes Principales - ACP	45
3.4 Análisis de Agrupamiento Jerárquico - AAJ.....	46
3.5 Interpretación Geoquímica de los Grupos	48
4. Conclusiones y Recomendaciones.....	63
4.1 Conclusiones.....	63
4.2 Recomendaciones.....	65

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1-1 Localización geográfica del Sistema Acuífero del Valle Medio del Magdalena.	19
Figura 1-2 Subzonas hidrográficas ubicadas en el SAVMM.....	20
Figura 1-3. Distribución espacial del balance hídrico de la zona del SAVMM.....	21
Figura 1-4. Delimitación estructural de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.....	22
Figura 1-5. Corte transversal generalizado de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena	22
Figura 1-6. Mapa Geológico Generalizado del Sistema Acuífero Valle Medio del Magdalena.....	23
Figura 1-7. Mapa de la geología estructural del sistema acuífero del VMM SAVMM.....	24
Figura 1-8. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena.....	25
Figura 1-9. Localización del sistema acuífero SAVMM Valle Medio del Magdalena.....	26
Figura 1-10. Unidades hidrogeológicas en el Sistema Acuífero Valle Medio el Magdalena	27
Figura 2-1. Portada del HidroVisor-ASVAMM.....	38
Figura 2-2. Visualización de los puntos de agua subterránea compilados en el HidroVisor ASVAMM.....	38
Figura 2-3. Ubicación geográfica de los puntos de agua subterránea identificados en la cuenca del VMM.....	39
Figura 2-4. Distribución espacial, tipo de punto y representación temporal de las muestras	40
Figura 3-1. Mapas de Isolíneas para Temperatura, pH y Conductividad Eléctrica.....	52
Figura 3-2. Diagrama de Piper de acuerdo con los grupos establecidos a través del Análisis de Agrupamiento Jerárquico.....	53
Figura 3-3. Proyección de los resultados del Análisis De Componentes Principales.....	54
Figura 3-4. Resultados del Análisis de Agrupamiento Jerárquico.....	55
Figura 3-5. Distribución espacial de las muestras de acuerdo con los resultados del Análisis de Agrupamiento Jerárquico.....	56
Figura 3-6. Diagrama de dispersión Conductividad eléctrica Vs Profundidad.....	57
Figura 3-7. Proyección del resultado del Análisis de Agrupamiento Jerárquico en el diagrama de Gibbs.....	58
Figura 3-8. Distribución espacial de los grupos 5 y 6.	59

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Características del sistema acuífero en la provincia hidrogeológica del Valle Medio del Magdalena,	28
Tabla 1-2. Resumen de las unidades hidrogeológicas presentes en SAVMM	28
Tabla 2-1. Fuentes de datos utilizadas para conformar la base de datos hidroquímicos del Valle Medio del Magdalena BDHVMM.....	41
Tabla 2-2. Parámetros fisicoquímicos reportados en la información consultada	42
Tabla 3-1. Estadística Descriptiva de los datos (las concentraciones de los iones analizados. Así como los de los SDT se expresan en mg/L el pH en sus unidades y la CE en $\mu\text{S/cm}$).....	60
Tabla 3-2. Resultados del Análisis de Componentes Principales y varianza explicada...	60
Tabla 3-3. Características químicas promedio de cada grupo (las concentraciones de los iones analizados. Así como los de los SDT se expresan en mg/L el pH en sus unidades y la CE en $\mu\text{S/cm}$)	61

Publicaciones

A continuación, se presenta los productos que se obtuvieron con esta investigación en congresos nacionales e internacionales.

- 1) Malagón Navarro J., Donado L., Hydrogeochemical Multivariate Analysis Groundwater in the Middle Magdalena Valley Aquifer System - Colombia: Study at a Regional Scale. Oral Presentation in the 43th IAH International Congress. Montpellier, France, September 2016.
- 2) Malagón Navarro J., Donado L., Piña A., Hydrogeochemical Multivariate Analysis Groundwater in the Middle Magdalena Valley Aquifer System – Colombia. Oral Presentation in the International Conference on Groundwater. Bogota, Colombia, Agosto 2017.
- 3) Aporte en la construcción del numeral de Calidad del Agua Subterránea, en la actualización de los Términos de Referencia Para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA en Proyectos de Explotación de Hidrocarburos, generados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – 2017.

Introducción

El Sistema Acuífero del Valle Medio del Magdalena (SAVMM), Colombia, se encuentra ubicado en la cuenca sedimentaria del Valle Medio del Magdalena zona del país con el mayor consumo de agua subterránea, con un 78% del agua concesionado a nivel nacional [IDEAM, 2014a]. El agua subterránea es utilizada para el suministro de agua potable, y el desarrollo de actividades agroindustriales. Esta zona del país se caracteriza por un alto grado de producción agrícola, minera e hidrocarburífera, lo que representa una fuente potencial de alteración de la calidad del agua subterránea [IDEAM, 2014a]. Adicionalmente, en esta zona se ubica el mayor yacimiento de gas de lutita del país [ANH, 2012], que para su explotación, se prevé el uso del fracturamiento hidráulico [DNP, 2014]. Hipótesis derivadas de diferentes estudios asocian la contaminación y conflictos del uso del agua subterránea con el desarrollo de este tipo de proyectos [Costa et al., 2017; Darraha et al., 2014; Osborn et al., 2011; U.S.EPA, 2016]. En respuesta a la creciente demanda de agua subterránea y un mayor riesgo de contaminación, se requiere para su gestión, una mejor comprensión de los procesos geoquímicos que determinan su composición y calidad.

Mientras la cantidad y disponibilidad del agua subterránea en la región ha sido caracterizada gracias a los estudios hidrogeológicos realizados por las autoridades ambientales nacionales y regionales [CORANTIOQUIA, 2008; IDEAM, 2013a; 2014a], el tema de calidad, y más concretamente los procesos geoquímicos que controlan la composición química del agua subterránea, están pobremente comprendidos. En el SAVMM, se han realizado estudios puntuales que contienen caracterizaciones fisicoquímicas para determinar la calidad del agua subterránea [CORANTIOQUIA, 2008; INGEOMINAS, 2002b], y las facies hidrogeoquímicas. El tipo de agua predominante en el acuífero de los municipios de Puerto Berrío y Puerto Nare (que hacen parte del SAVMM) fue determinada por Arismendy et al. [2003] y corresponde a agua del tipo bicarbonatada

sódica y en menor proporción bicarbonatada cálcica. En 2013 se delimitó el SAVMM [IDEAM, 2013a] y en 2014 IDEAM [2014b] presentó un análisis hidrogeológico de la zona, en el cual se concluyó que el nivel de conocimiento del SAVMM no es suficiente para la gestión del agua subterránea [IDEAM, 2014a]. Actualmente, sólo se han presentado resultados dispersos de informes de consultoría locales, aproximaciones generales y puntales de la calidad y clasificación geoquímica, así como análisis fisicoquímicos dispersos de la calidad del agua subterránea ubicada en el SAVMM, pero a la fecha no se han realizado estudios exhaustivos (que incluyan el uso de técnicas multivariadas) para identificar y comprender los procesos que controlan la composición y calidad del agua subterránea en el SAVMM.

Para el estudio geoquímico del agua subterránea, desde principios de la década de 1920, se han desarrollado diversas técnicas gráficas y estadísticas para facilitar su clasificación, con el objetivo final de dividir las en grupos homogéneos [Güler et al., 2002]. Los métodos estadísticos multivariados se han aplicado ampliamente para investigar los fenómenos del ambiente [Chou et al., 2012; Gimenez-Forcada et al., 2017; Gong et al., 2005], facilitando la evaluación de grandes cantidades de datos. El análisis estadístico multivariado (AEM) ha sido aplicado con éxito en una serie de estudios hidrogeoquímicos. Por ejemplo el AEM fue utilizado por Steinhorst y Williams [1985] para identificar las fuentes de agua subterránea con base en datos químicos, en el estudio de Farnham et al. [2003], se aplicó el AEM a la química de los elementos traza del agua subterránea. Por otra parte Melloul y Collin [1992] implementaron el uso del Análisis de Componentes Principales (ACP) para identificar los principales grupos de agua y componentes que afectan su calidad. El ACP fue usado por Villegas et al. [2013] para evaluar los principales procesos que controlan la química del agua subterránea en el acuífero confinado de Urabá-Colombia. Matiatos et al. [2014], apoyó su estudio isotópico con un ACP con el objetivo de interpretar las variaciones espaciales en la calidad del agua subterránea en la región del Peloponeso nororiental-Grecia. Por otro lado Blake et al. [2016], evaluó la procedencia del agua termal ubicada en la cuenca carbonífera de Dublín (Irlanda) implementado un Análisis de Agrupamiento Jerárquico (AAJ) y un ACP, enfoque también utilizado por Noshadi y Ghafourian [2016], quienes usaron el AAJ y el ACP para investigar la calidad del agua de la provincia de Fars, ubicada al sur de Irán. A su vez Cloutier et al. [2008]; Ghesquière et al. [2015]; Montcoudiol et al. [2014], utilizaron en sus estudios el AAJ, para identificar los procesos primarios responsables de la química y evolución geoquímica del agua subterránea ubicada en la

región de Basses-Laurentides, Charlevoix/Haute-Côte-Nord y Outaouais Canadá respectivamente.

En este trabajo se compilaron las caracterizaciones fisicoquímicas disponibles en los Estudios de Impacto Ambiental (EIA), Planes de Manejo Ambiental (PMA) e Informes de Cumplimiento Ambiental (ICA), presentados ante la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), por parte de las empresas interesadas en desarrollar proyectos de exploración y producción hidrocarburos en el SAVMM. Para el análisis de las muestras recopiladas se utilizaron métodos gráficos, hidroquímicos, estadísticos descriptivos y multivariados. Para estudiar la relación entre los parámetros químicos y clasificar las muestras en grupos, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) y un Análisis de Agrupamiento Jerárquico (AAJ). Los resultados del ACP y del AAJ se correlacionaron con la geología e hidrogeología del SAVMM, lo cual permitió identificar los principales procesos geoquímicos que controlan la composición y calidad del agua subterránea. Los resultados derivados de este estudio permitieron aportar al conocimiento hidrogeoquímico y así, coadyuvar a la gestión y el desarrollo futuro del recurso hídrico subterráneo en la región.

Este documento contiene la descripción del área de estudio, su geología e hidrogeología, se presenta la metodología de compilación, construcción y procesamiento de la base de datos hidroquímicos, la implementación del AEM con base en el ACP y AAJ. Se define la química y los tipos de agua subterránea determinados a través de técnicas gráficas como el diagrama de Piper, Stiff y Gibbs. Por último, incorporando el conocimiento geológico e hidrogeológico de la zona de estudio, se analizan los resultados del ACP y del AAJ para identificar los principales procesos geoquímicos que controlan la composición química del agua subterránea en el SAVMM.

1. Descripción del Área de Estudio

El Sistema Acuífero de Valle Medio del Magdalena (SAVMM) se encuentra ubicado en la cuenca sedimentaria del Valle Medio del Magdalena, abarca una superficie de 14.913 km² y se encuentra limitado por la Cordillera Central al occidente y la Cordillera Oriental al oriente como se aprecia en la Figura 1-1. Se caracteriza por tener una topografía suave, con una elevación promedio de 186 msnm y máxima de 600 msnm. La dinámica fluvial de la zona es contralada por el Río Magdalena, principal corriente superficial del país. La zona de estudio tiene una temperatura media de 25,6°C, un régimen de precipitación bimodal, registrando precipitaciones medias de 2.871 mm/año, una evapotranspiración potencial calculada mediante el método de FAO-Pennman Monthieth [Allen et al., 1998] de 1.313 mm/año. A continuación, se detallan la hidrología, geología e hidrogeología de la zona.

1.1.1 Descripción Hidrológica

La red hídrica superficial del SAVMM está conformado por los ríos Nare, Carare, San Bartolo, Opón, Cimitarra, Sogamoso y Lebrija, contando con diez (10) subzonas hidrográficas de acuerdo a la clasificación hecha por el IDEAM [2013b], como se muestra en la Figura 1-2.

En la zona se identifican estaciones hidrometeorológicas operadas principalmente por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), las cuales recopilan información tanto de parámetros hidrológicos como climáticos, y cuya distribución se muestra igualmente en la Figura 1-2. De las estaciones identificadas, 18 son de tipo climatológico y reportan parámetros como precipitación, temperatura, brillo solar y velocidad del viento; 49 son de tipo limnimétrico y cuentan con registros de caudales, por último 53 son de tipo pluviométrico, las cuales reportan datos de precipitación.

A partir de los registros de datos mensuales, en el periodo comprendido entre los años 2005 y 2014 (periodo que coincide con las caracterizaciones fisicoquímicas compiladas), se realizó la distribución espacial de los parámetros climáticos promedios, de los cuales se obtuvo mapas de distribución de la precipitación, evapotranspiración de referencia calculada mediante el método de la FAO-Pennman Monthieth [Allen et al., 1998] y, a partir de éstos, una estimación de la escurrentía generada en la cuenca mediante un balance hídrico [IDEAM, 2016].

Tras analizar la información promedio de la zona de estudio, se identificó: una temperatura media de 25,6°C, un régimen de precipitación bimodal, registrando precipitaciones medias de 2.871 mm/año, una evapotranspiración potencial de 1.313 mm/año, respecto al mapa estimado de escurrentía (Figura 1-3b), se evidenció que en la zona norte del área de estudio se presentan los mayores déficits hídricos.

1.1.2 Descripción Geológica

El SAVMM se ubica geológicamente en la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM); dicha cuenca es catalogada como de intramontaña, con una extensión aproximada de 34.000 km², ubicada entre la Cordillera Oriental y la Cordillera Central (Figura 1-4). Se encuentra delimitada por el sistema de fallas del Espíritu Santo en el Norte; el Cinturón Plegado de Girardot por el sur; al Occidente por el onlap de los sedimentos Neógenos contra el basamento de la Serranía de San Lucas y la Cordillera Central, y finalmente al Noreste por el sistema de fallas Bucaramanga –Santa Marta y Bituima, la Salina [ANH, 2007].

Las unidades sedimentarias que componen la cuenca se desarrollan sobre un basamento ígneo – metamórfico, rellenando la cuenca desde el Jurásico hasta depositarse los más jóvenes de edad Plioceno – Holoceno. Se han interpretado tres eventos de sedimentación en la cuenca, suprayaciendo rocas ígneas y metamórficas de edad precretácica. La primera secuencia, se depositó en ambientes continentales a marginales de rift intracratónico durante el Triásico y comienzos del Jurásico; la segunda, ocurrida durante el Jurásico – Cretáceo, sedimentada en ambientes fluviales y litorales, durante una fase de extensión producto de un rift de retro-arco, y la tercera, identificada como la secuencia

del Cretáceo - Paleoceno, sedimentada en condiciones marinas, durante un proceso tectónico de subsidencia termal [ANH, 2011].

La acumulación y sedimentación de la cuenca, se vio interrumpida en el Eoceno Medio, gracias a diferentes cambios globales, que dieron origen a un periodo de alta tasa de erosión en la mayoría del territorio colombiano, posteriormente la sedimentación fue restablecida en el marco de una cuenca tipo foreland hasta el Mioceno temprano. En el Mioceno medio la mayor deformación que dio paso a la Cordillera Oriental gracias a la inversión de los sistemas de fallas normales del Triásico-Cretácico, separa definitivamente las cuencas del Valle Medio del Magdalena y Llanos Orientales [Cooper, 1995].

- **Geología Estructural**

Debido al control sedimentario ejercido por el Río Magdalena a lo largo de la zona de estudio, las estructuras geológicas preservadas son muy pocas; sin embargo, se reportan diferentes lineamientos y deformaciones asociadas al levantamiento de la cordillera oriental en el flanco occidental de la misma ubicado en el extremo oriental del área de estudio (Figura 1-7).

Dentro de las principales estructuras geológicas identificadas en el área de estudios, de acuerdo con el Mapa geológico de Colombia (SGC, 2015), se resaltan el sinclinal de Nuevo Mundo, el sinclinal de Peña de Oro, Anticlinal de Simiti, Sinclinal del Ermitaño entre otros. Dichos pliegues tienen una orientación preferencial norte-sur y se encuentran deformando unidades cretácicas y paleógenas.

Del mismo modo se reconocen lineamientos correspondientes a fallas producto de esfuerzos compresivos al occidente del área de estudios; la mayor parte de estas fallas son inversas de bajo ángulo, dentro de las que se destacan, la falla de Arrugas, falla de Infantas, falla de Cambrás, entre otras; todas ellas de orientación Norte Sur. Por otro lado, se destaca la presencia de fallas de rumbo con componente dextral como falla las Brisas, Falla San Blas y falla Cimitarra.

Por último, se encuentra la Falla de Casabe de gran importancia para que los sistemas petrolíferos se presenten en el extremo sur del área de estudio, dicha falla se encuentra al este del municipio de Barrancabermeja y se extiende en dirección NE desde el extremo W de la plancha 119 Barrancabermeja. Tiene una extensión aproximada de 39 km y es de

tipo normal, con plano de falla buzante al W, y con una dirección de rumbo NE-SW; se encuentra cubierta por sedimentos cuaternarios y la Formación Mugrosa. Es una falla vertical que afecta desde el basamento a toda la secuencia sedimentaria: formaciones cretácicas y terciarias [ANH, 2011].

- **Geología Local**

El SAVMM se encuentra delimitado por diferentes sistemas de fallas, cinturones plegados y basamentos característicos de la historia geológica colombiana [ANH, 2007]. El área de estudio comprende unidades sedimentarias y cristalinas relacionadas con diferentes procesos geológicos desarrollados entre el Jurásico y el cuaternario reciente. El principal agente que influenció los procesos de sedimentación de las rocas ubicadas en el SAVMM fue la incursión marina desarrollada durante el Cretácico, que dejó a su paso evidencias paleontológicas en algunas unidades. A partir del Paleógeno, inicia el proceso de inversión tectónica de la cuenca, lo que resulta en un cambio en el ambiente de depositación de las unidades litoestratigráficas del área de estudio; las unidades pasan de un ambiente marino a un ambiente controlado por procesos fluviales evidenciados en las formaciones con mayor presencia en el SAVMM: Grupo Real, Formación Mesa y Depósitos Cuaternarios [INGEOMINAS, 2003] como se muestra en la Figura 1-6.

El basamento del SAVMM, se compone de unidades calcáreas intercaladas con unidades de ambientes marinos profundos de edad cretácica que, debido al cambio en el régimen tectónico, contiene fracturas a través de las cuales fluye el agua subterránea, infrayaciendo una secuencia de unidades de origen fluvial de edad Cenozoica. Por encima de dicho basamento, se encuentran las rocas sedimentarias y depósitos no consolidados que conforman la mayor parte del SAVMM, dichas unidades, en su mayoría corresponden a depósitos recientes asociados a la dinámica fluvial en las zonas más profundas de la cuenca del Valle Medio del Magdalena, debido a esto, se dan variaciones granulométricas ideales para el almacenamiento del agua. La geometría de los cuerpos cuaternarios que cubren la región varía de acuerdo a la geomorfología de ambiente fluvial que controla la litología del área de estudio, y en consecuencia se encuentran unidades cuaternarias como abanicos, terrazas y llanuras aluviales [INGEOMINAS, 2003].

- **Estratigrafía Local**

El SAVMM, se encuentra cubierto en un 95% por rocas sedimentarias divididas en 12 formaciones litoestratigráficas, del mismo modo se identificaron 4 cuerpos litodémicos para un total de 16 unidades litológicas en la parte occidental del área de estudio, pertenecientes a procesos tectónicos que dieron origen a la formación de la cordillera central como son: el Batolito de Segovia y el Complejo Cajamarca. La sucesión estratigráfica del Valle Medio del Magdalena se muestra en la Figura 1-8. A continuación, se hace una descripción litológica siguiendo la secuencia estratigráfica del SAVMM en función de las unidades geológicas identificadas en el área de estudio (Figura 1-6).

- **Pre-Cretácico**

- ✓ Batolito de Segovia

Corresponde a un cuerpo plutónico alargado en sentido norte sur, que se encuentra principalmente al este de la falla Otú-Pericos con algunos cuerpos satélites al oeste de la misma [Feininger, 1972]. Aflora al sur y el centro de Zaragoza. Su composición es principalmente diorítica, aunque puede ser localmente cuarzosa y básica con presencia de hornblendas, de acuerdo con dataciones en estas, la edad de la unidad es de 160 millones de años, es una roca encajante de los filones de cuarzo aurífero que se explotan en la zona Complejo Cajamarca [Gonzalez, 1992].

- ✓ Complejo Cajamarca

El Complejo Cajamarca o en parte Terreno Cajamarca según [Serna, 1986], está limitado al oeste por la Falla San Jerónimo [McCourt, 1984]. Esta unidad está compuesta por rocas metamórficas de bajo grado de edad Paleozoica, que constituyen el basamento de la Cordillera Central.

- ✓ Formación Noreán

La formación Noreán, recibe su nombre gracias a Jairo Clavijo en 1996. Corresponde a una secuencia volcanoclástica que aflora principalmente en el departamento de Santander. Su composición es principalmente piroclástica con fragmentos de composición dacítica a andesítica en el Oriente de la serranía de San Lucas. Se cree que está relacionada a eventos volcánicos del jurásico [Clavijo, 1996].

- **Cretácico**

- ✓ Formación La Luna

Se caracteriza por su predominancia de lodolitas calcáreas - grises- fosilíferas laminadas, con nódulos de micritas de hasta 1 m de diámetro, con intercalaciones locales de calizas biomicríticas, grises duros en capas medianas planas paralelas. Hacia la parte media y alta se intercalan capas muy delgadas de chert negro. Su espesor medido en superficie es de 188 m y de 300 a 350 m en el subsuelo. Aflora en pequeñas proporciones en el SAVMM, pero en general en la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) su afloramiento es mayor, en la franja conformada por colinas suaves, paralelamente al brazo Simití Morales, que la divide en dos al Sur de esta última localidad. Su edad ha sido motivo de discusión, sin embargo, fue introducida en la nomenclatura del Valle Medio del Magdalena por [L. Morales, 1958]. Dentro de este trabajo esta formación es considerada de edad Cretácica Superior (Coniaciano-Santoniano). Se trata de una de las principales unidades generadoras de hidrocarburo en Suramérica, gracias a su alto contenido de materia orgánica.

- **Paleógeno**

- ✓ Grupo Chorro

Hace referencia a las rocas del Eoceno y Oligoceno temprano, compuesto por las formaciones Esmeraldas y La Paz. La Formación Esmeraldas fue nombrada por [L. Morales, 1958], su sección tipo está cerca al caserío Esmeraldas junto al río Sogamoso. Esta se compone de areniscas grises y verdosas de grano fino con intercalaciones de limolitas y lutitas rojas, púrpura y pardo; contiene algunas capas de carbón. El ambiente deposicional fue bajo condiciones lagunares deltaica, el espesor se ha calculado en 1.200 m, por debajo de ella se encuentra la formación La Paz mientras que el contacto superior es con la Formación Mugrosa; su edad aproximada es del Oligoceno medio.

La Formación La Paz, es la porción basal del grupo Chorro, sus depósitos son predominantemente de río trenzado con un espesor constante; se compone de areniscas de color gris claro con estratificación cruzada y conglomerados lenticulares, presenta intercalaciones de calizas grises moteadas. Localmente tiene niveles de limolitas y lutitas [Montgomery, 1992]. En la parte inferior se presenta un paquete de 30 m de arcillolitas que

es conocido como el Miembro Toro y se encuentra en contacto discordante sobre la formación Lisama.

✓ Grupo Chuspas

Corresponde a la unidad litoestratigráfica de rango mayor que incluye las formaciones Mugrosa y Colorado [L. Morales, 1958]. El intervalo cronoestratigráfico es Eoceno superior - Oligoceno.

La Formación Mugrosa limita en la base con el nivel fosilífero Los Corros y al tope con el nivel fosilífero de Mugrosa. La parte basal de la formación, consiste en areniscas de grano fino a medio- color gris- con intercalaciones de lutitas grises y azules [Mora y Rizzi, 2004]. De acuerdo con las dataciones en los horizontes fosilíferos Los Corros y Mugrosa, la edad de la Formación Mugrosa se encuentra en el intervalo Oligoceno temprano a medio [Taborda, 1965]. Los ambientes de la Formación Mugrosa pasan de abanicos aluviales al occidente a sistemas de ríos meándricos en el centro y oriente de la cuenca. El contacto superior con la Formación Colorado es concordante [Taborda, 1965].

La Formación Colorado se encuentra constituida por lutitas masivas de color violeta rojizo con varias capas masivas de areniscas localmente conglomeráticas, con granocrecimiento. Los ambientes de acumulación para el miembro inferior fueron planicies deltaicas costeras mientras que el miembro superior fue depositado bajo ambientes de planicies de inundación fluviales. El espesor de la Formación Colorado es aproximadamente de 800 m en el occidente de la cuenca y aumenta hacia el Oriente.

• **Neógeno**

✓ Grupo Real

Descrita y publicada originalmente por Wheeler [Porta, 1974], 2 Km al oeste de la Quebrada Real situada al norte del Río Opón. Inicialmente fue dividida en cinco formaciones que desde la base a la parte superior son: Lluvia, Chontorales Shale, Hiel, Enrejado Shale y Bagre. En el área del Río Opón la sucesión inicia con 30 m de conglomerados compuestos por fragmentos silíceos de chert blanco, arcillolitas ferruginosas y horizontes locales de carbón, siguen 500 m de areniscas conglomeráticas, las cuales exhiben estratificación cruzada con intercalaciones de lutitas de color moteado de gris y azul (Formación Lluvia).

Ascendiendo desde la base se encuentran 1.300 m de lodolitas abigarradas grises a rojizas de origen continental intercaladas con areniscas grises en capas delgadas, con estratificación cruzada y ondulitas (Chontorales Shale). Seguidas, se encuentran 1.100 m de areniscas conglomeráticas de coloración gris azulosa con contenidos locales de hornblenda y augita, con estratificación cruzada y fragmentos de plantas carbonizados [L. Morales, 1958]. Al existir tanta diversidad de litologías, se pueden inferir diferentes ambientes de formación, la mayoría de estos fluviales. Los intervalos conglomeráticos hacen referencia a ambiente fluviales de montaña de alta energía; las secuencias de lodolitas corresponden a ambientes de ríos meandriformes a anastomosados; mientras que las secuencias de areniscas con presencia de glauconita indican un ambiente de frente de playa. Regionalmente existen inconformidades estratigráficas bien definidas entre el Grupo Real con la infrayacente Formación Colorado y el suprayacente Grupo Mesa, el espesor promedio del Grupo Real es de aproximadamente 3.600 m, se considera que la edad de su deposición se encuentra entre el Mioceno medio y el Plioceno.

✓ Formación Mesa

La Formación Mesa en el área de estudio se encuentra compuesta por conglomerados masivos, areniscas líticas con estratificación cruzada y menores capas de lodolitas. Presenta un espesor de 575 m [L Morales, 1958], reposa concordantemente sobre el Grupo Real, y es una unidad restringida al área de la cuenca del VMM, desde el occidente del cinturón plegado y fallado de la Cordillera Oriental [Gomez, 2001]. A lo largo del área de estudio, la Formación Mesa al igual que el Grupo Real, presenta inclinaciones hacia el suroriente, lo cual se interpreta como la respuesta flexural de la cuenca a la carga tectónica de la Cordillera Oriental [Gomez, 2001].

• **Depósitos Cuaternarios**

Los depósitos cuaternarios son depósitos inconsolidados, los cuales hasta el momento no han sufrido procesos diagenéticos o de litificación hasta llegar a formar rocas propiamente dichas. El origen de estos depósitos puede ser aluvial, coluvial, fluvio-lacustre. principalmente.

✓ Depósitos Terrazas Aluviales

Esta unidad se encuentra conformada por diferentes depósitos de origen fluvial conformados por diferentes tipos de litologías de acuerdo con el área donde se ubique. En

algunas localidades predominan arenas líticas con estratificación cruzada en artesa y capas gruesas canaliformes de conglomerados clastosoportados, polimícticos, angulares a subredondeados, muy mal seleccionados, con tamaños de 1 a 20 cm. Presentan una composición litológica de sedimentos limo-arcillosos en la parte superior y de intercalaciones de gravas, arenas gruesas y limos hacia la base, depositados en un ambiente fluvial, con un espesor máximo de 40 m que reposan sobre la Formación Mesa. Este tipo de depósitos se forma debido a la deposición de sedimentos que han sido transportados por corrientes de agua, como lo son arroyos, quebradas o ríos, en zonas de inundación, a lo largo del área de caracterización se encuentran como depósitos de planicie aluvial, de dique aluvial y vegas de divagación.

✓ Depósitos de Abanicos y Coluviales Recientes

Los abanicos aluviales presentes en el área de estudio se encuentran asociados a la acción erosiva desarrollada en el flanco occidental de la cordillera oriental; gracias a la topografía existente se da una distribución a manera de abanico de los cuerpos coluviones producto de la meteorización en la cordillera. Dichos cuerpos están conformados por sedimentos no consolidados de diversos orígenes gracias a las unidades sedimentarias presentes en la cordillera. Las características estratigráficas que exhiben estos depósitos varían desde facies de arenas muy finas a gruesas y dependiendo el nivel de energía del transporte se pueden encontrar sedimentos de mayores tamaños, como gravas, en general la forma de los clastos es redondeada a subredondeada.

✓ Depósitos Fluvio – Lacustres

A lo largo del área de estudio se distinguen sedimentos fluvio – lacustres, depósitos de llanura de inundación y de planicie fluvio – lacustre. La característica estratigráfica principal de este tipo de depósitos presenta facies de sedimentos finos de arena y lodos con altos contenidos de materia orgánica.

✓ Depósitos Fluviales del Río Magdalena

Se refiere a los depósitos de llanura aluvial de los afluentes de Río Magdalena, se encuentran generalmente sedimentos tamaño arcillas y limos, aunque se observan aportes en menor cantidad de granos tamaño arena y grava.

- **Mineralogía Local**

Las unidades geológicas del SAVMM están conformadas por rocas sedimentarias, por ello el análisis mineralógico de las unidades presentes en el área de estudio, está condicionado por el origen de los clastos que componen los depósitos sedimentarios consolidado y no consolidados. De esta manera, los principales minerales que puedan ser encontrados, son los silicatos abundantes en las zonas de aporte de la cuenca del Valle Medio del Magdalena. En la base de las Cordilleras Oriental y Central (límites del SAVMM), se encuentran cuerpos ígneos de composición andesítica a granítica, con abundancia de cuarzo, feldespatos al igual que anfíboles piroxenos y filosilicatos estos últimos en menor proporción. Del mismo modo en el área de influencia del SAVMM se encuentran unidades sedimentarias cretácicas calcáreas de composición micrítica y esparítica con abundancia de materia orgánica [L. Morales, 1958].

1.1.3 Descripción Hidrogeológica

EL IDEAM [2013a] realizó la clasificación y codificación hidrogeológica de Colombia que agrupa en 16 provincias hidrogeológicas al país basándose en la división geológica que realiza la Agencia Nacional de Hidrocarburos para el mapa de subcuencas del país a partir de los rasgos tectonoestratigráficos y límites estructurales. Inicialmente el área de estudio fue nombrada por el IDEAM [2013a] Puerto Berrio-Nare-Yondo, posteriormente el IDEAM [2014a] con un mayor conocimiento hidrogeológico amplió su delimitación y le asignó el nombre de Sistema Acuífero Valle Medio del Magdalena. El SAVMM se localiza en la provincia hidrogeológica intramontana del Valle Medio del Magdalena PM1 (Figura 1-9). En la Tabla 1-1, se describen las características hidrogeológicas del SAVMM.

El SAVMM está conformado por distintos niveles hidrogeológicos de edad cuaternaria cuya principal característica es la baja consolidación y predominio de sedimentos como arena y grava, intercalados con materiales de grano fino como arcillas y limos. Dentro del SAVMM, las unidades que funcionan como acuífero son los depósitos aluviales recientes y de terraza que afloran en cercanías del Río Magdalena cuyo origen se asocia a dicho cuerpo de agua, y los sedimentos detríticos poco consolidados (areniscas, conglomerados) de la Formación Mesa y el Grupo Real. Además de las unidades clásticas que los conforman, existen del mismo modo unidades acuíferas con porosidad secundaria debido a su

composición calcárea como la Formación La Luna. Estas unidades se distribuyen y conforman acuíferos libres a semilibres multicapa en unidades recientes y acuíferos semiconfinados a confinados en unidades más antiguas del Neógeno [IDEAM, 2013a]. El SAVMM, presenta una recarga directa a partir de la infiltración sobre las unidades acuíferas libres que lo conforman, estimada entre 0 y 500 mm/año, con espesores saturados que varían de 80 a 230 m y valores de la transmisividad entre 100 a 200 m²/día. [IDEAM, 2014b].

El régimen hidrogeológico está controlado por el Río Magdalena, siendo este la principal zona de descarga existente para el área de estudio, debido a la configuración topográfica y geológica del SAVMM. La dirección del flujo regional subterráneo es convergente hacia el Río Magdalena pero con sentido hacia el norte [INGEOMINAS, 2003], sin embargo, en los períodos donde aumenta la pluviosidad, puede darse una recarga de las unidades hidrogeológicas adyacentes al Río Magdalena, gracias a la sobresaturación de las mismas. Mientras que en temporada de estiaje puede darse un proceso contrario donde el agua subterránea almacenada en las unidades adyacentes descarga y aporta al caudal base del río.

- **Unidades Hidrogeológicas**

Las unidades hidrogeológicas encontradas en el área de estudio son clasificadas de acuerdo con los criterios de productividad y capacidad para almacenar (porosidad), y transmitir agua (permeabilidad). De acuerdo a la nomenclatura internacional, establecida por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH), y estructurada por el [INGEOMINAS, 2002a].

Las diferentes formaciones acuíferas y no acuíferas que se encuentran aflorando en el SAVMM, están compuestas por una o varias formaciones geológicas, las cuales en la leyenda han sido agrupadas en tres categorías principales que dependen del tipo de porosidad de las rocas, de la ocurrencia o no de agua subterránea y del valor de la capacidad específica (Figura 1-10). Estas categorías se definen como: (A) sedimentos y rocas con flujo intergranular; (B) rocas con flujos a través de fracturas, y (C) sedimentos y rocas con limitados recursos de agua subterránea, consideradas estas últimas prácticamente impermeables.

El SAVMM está conformada en un 96.5% por rocas y sedimentos con flujo esencialmente intergranular reunidas en el grupo A; dentro de este grupo la mayoría corresponde a acuíferos continuos de extensión regional, de alta productividad, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados y rocas sedimentarias paleógenas poco consolidadas de ambiente fluvial, glaciofluvial, marino y volcanoclásticos. En menor proporción se encuentran las unidades acuíferas con flujo a través de fracturas; dicha unidad abarca el 1,3% del área total y está representada por la Formación la Luna y la Formación Tablazo cuya composición calcárea les permiten tener dichas propiedades de flujo. Las rocas con una capacidad nula de almacenamiento de agua subterránea cubren el 2,1% del área estudiada, corresponden a los cuerpos cristalinos como el batolito de Segovia y Complejo Cajamarca que actúan como basamento de la cordillera Central.

La clasificación hidrogeológica en el área de estudio de acuerdo con el tipo de litología, porosidad y grupos dentro del SAVMM se describen a continuación:

- **SEDIMENTOS Y ROCAS CON FLUJO INTERGRANULAR**

Se les denomina así a los sistemas acuíferos con una porosidad que permite el flujo de agua, por lo general se debe a su bajo grado de consolidación y el tamaño de grano.

- **A2 - Sistemas acuíferos de alta productividad, capacidades específicas entre 2.0 y 5.0 l/s/m.**

Corresponde a los acuíferos continuos de extensión regional, conformados por sedimentos cuaternarios de baja consolidación o no consolidados que desarrollan acuíferos de tipo libre y semiconfinados multicapa.

Dentro de este grupo hidrogeológico y aflorando en el área de estudio se encuentran las unidades acuíferas de Depósitos de Llanura aluvial y abanicos. Cubren 86,29% del área del SAVMM. Dichas unidades acuíferas cuaternarias, están compuestas por sedimentos inconsolidados de origen aluvial que rellenaron durante el Cuaternario una paleo topografía irregular controlada por la dinámica fluvial del Río Magdalena y demás afluentes principales, razón por la cual son muy comunes sus cambios laterales de facies y de espesores. Se identifican depósitos recientes no consolidados de tipo coluvial y aluvial los

cuales conforman acuíferos libres, constituyéndose en el sistema más extenso a través de la cual se generan los principales puntos de agua inventariados.

- **A3 Sistemas acuíferos de mediana productividad, capacidades específicas entre 1.0 y 2.0 l/s/m.**

Corresponde a los acuíferos continuos de extensión regional, conformados por rocas sedimentarias terciarias y sedimentos cuaternarios poco consolidados de ambiente fluvial a transicional que desarrollan acuíferos de tipo libres y confinados. Cubren el 4,78% del área del SAVMM y hacen parte de este sistema los acuíferos de depósitos de terrazas aluviales.

Los diferentes depósitos de terrazas generalmente se encuentran asociados a acumulación de sedimentos conglomeráticos clastosoportados muy mal seleccionados, estas características permiten tener una recarga y productividad hidrogeológica moderada por sus condiciones de permeabilidad y porosidad [ATG, 2015]. Este sistema presenta un gran potencial como recurso hidrogeológico dadas sus características litológicas tipo cantos y bloques angulares a subredondeados, constituidos por rocas intrusivas y volcánicas en una matriz arenosa de grano medio a grueso.

- **A4 – Sistemas acuíferos de baja productividad, capacidades específicas entre 0.05 y 1.0 l/s/m.**

Corresponden a este grupo los depósitos fluvio-lacustres que forman acuíferos discontinuos de extensión local, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial de llanura aluvial y litoral. Cubren el 5.34% del área del SAVMM

Hace referencia a los depósitos de la llanura fluvial en zonas inundadas por la dinámica hídrica, cercana al Río Magdalena que constituyen unidades discontinuas de extensión local de baja productividad, conformadas por sedimentos cuaternarios poco consolidados de grano fino con pobres propiedades de permeabilidad, lo que impide el flujo de agua por este medio.

- **ROCAS CON FLUJO POR FRACTURAMIENTO**

- **B2 – Sistemas acuíferos de mediana productividad, capacidad específica entre 1.0 l/s/m y 2.0 l/s/m**

Se encuentran dentro de este grupo los sistemas de acuíferos discontinuos de extensión semiregional a regional que cubren el 1,37% del área del SAVMM, conformados por rocas sedimentarias clásticas y carbonatadas de edad cretácica depositadas en ambientes marinos. Desarrollan acuíferos confinados con agua aprovechable para cualquier uso.

Hacen parte de este tipo de acuíferos las rocas de la Formación La Luna la cual se encuentra compuesta por lodolitas laminadas, calizas alternadas con chert, capas que presentan espesores de hasta 350 m, que permiten el almacenamiento de agua subterránea con moderadas capacidades específicas. Se presentan muy bien estratificadas en capas gruesas, las cuales se comportan como acuíferos de mediana productividad.

- **ROCAS CON LIMITADOS RECURSOS DE AGUA SUBTERRÁNEA**

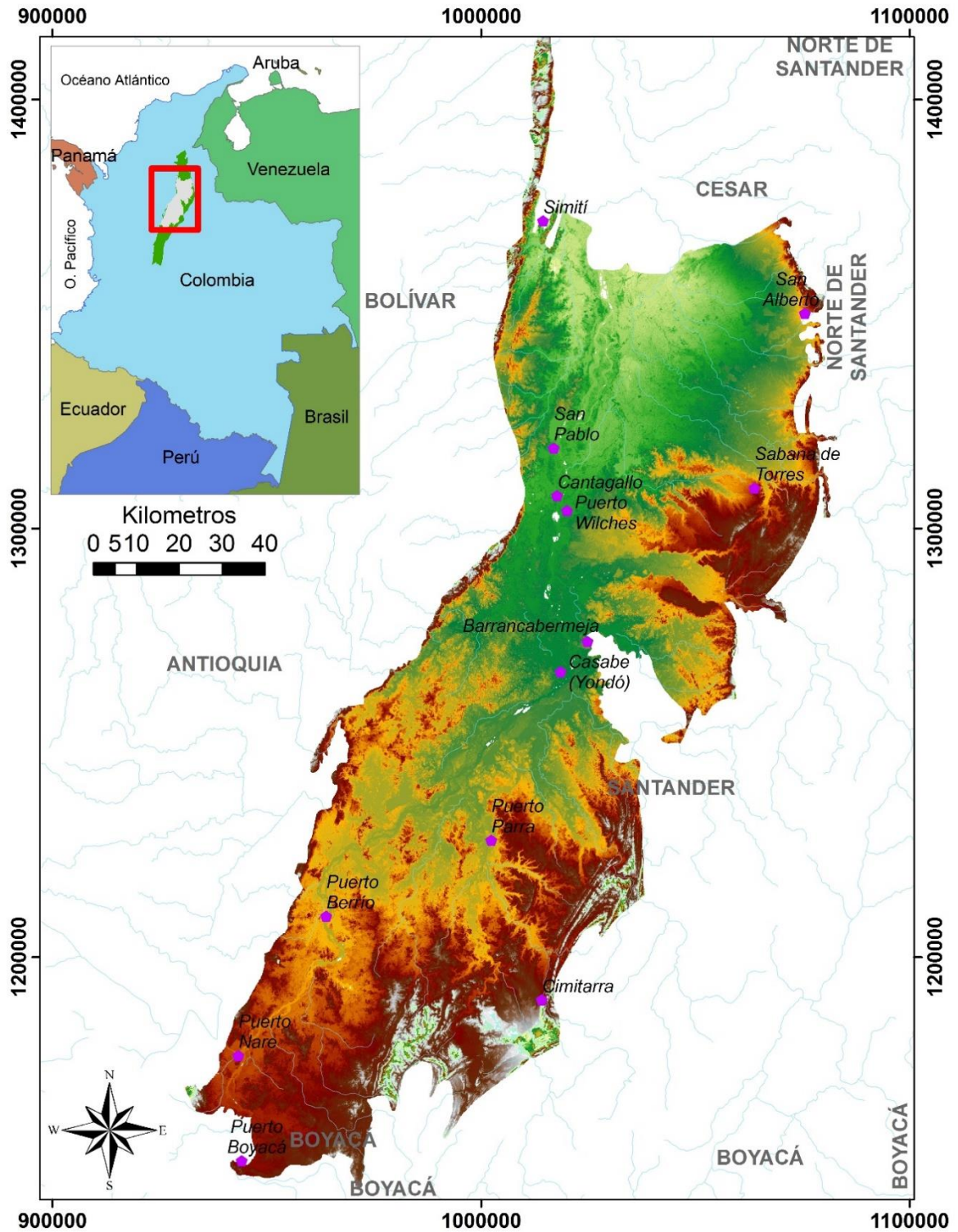
Generalmente son complejos ígneo-metamórficos que no permiten la conductividad y carecen de propiedades permeables por su alta compactación, Son unidades con muy baja productividad, su comportamiento se correlaciona con acuífugos, unidad absolutamente impermeable que no puede almacenar o transmitir agua.

- **C2 – Sistemas acuíferos con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m.**

A este grupo corresponden los complejos de rocas ígneas y metamórficas muy compactas y en ocasiones fracturadas de edades Cretácico a Precámbrico. Se comportan básicamente como acuífugos. Se encuentran las rocas de las unidades litológicas, Formación Noreán, Batolito de Segovia y Complejo Cajamarca, cubren el 2,2% del SAVMM.

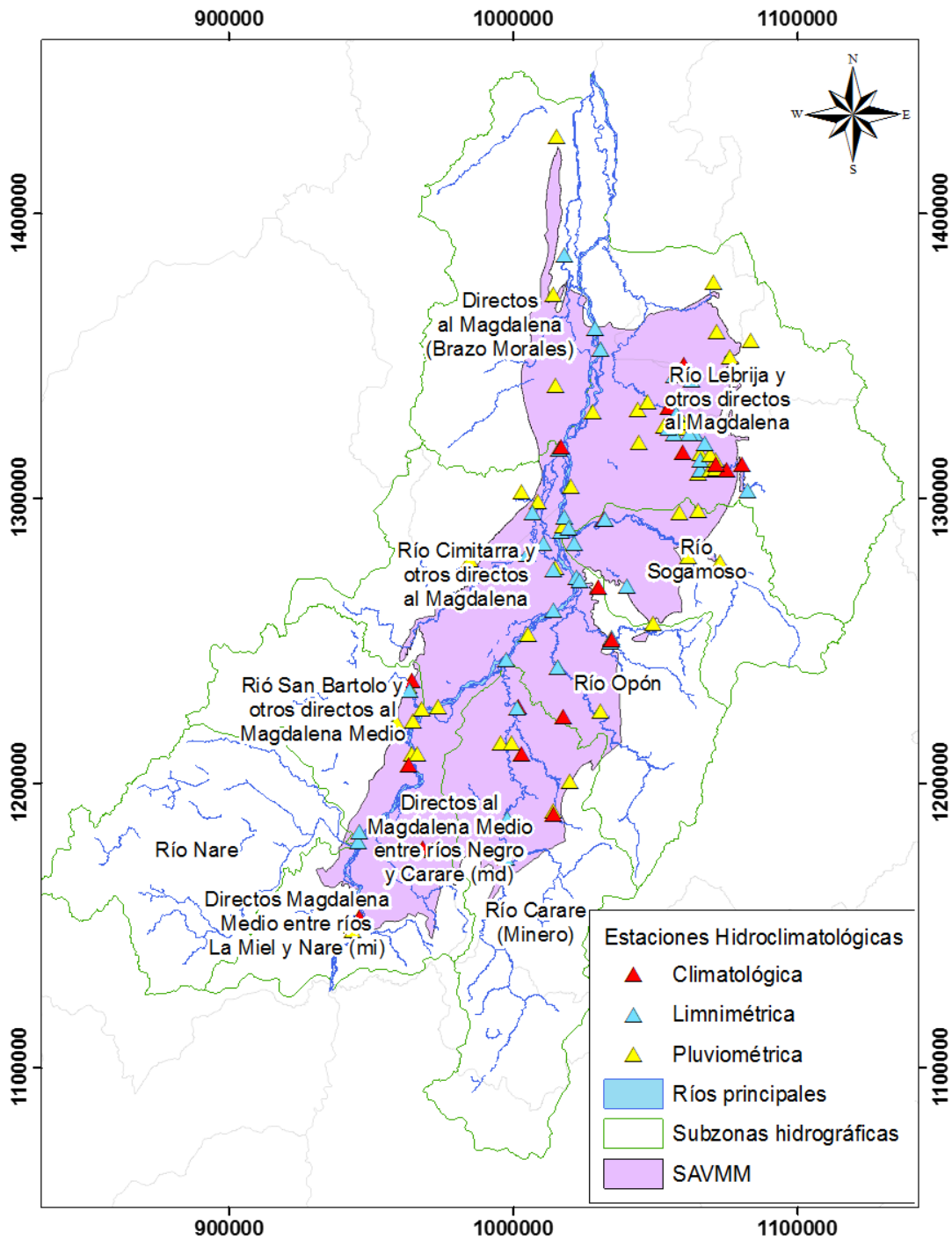
La clasificación hidrogeológica para cada una de las unidades litoestratigráficas reconocidas en el SAVMM se resume en Tabla 1-2; del mismo modo se describen sus principales características litológicas y el tipo de acuífero que las conforman de acuerdo con su potencial de almacenamiento.

Figura 1-1 Localización geográfica del Sistema Acuífero del Valle Medio del Magdalena.



Escala 1:980.000 (modificado de IDEAM 2014a)

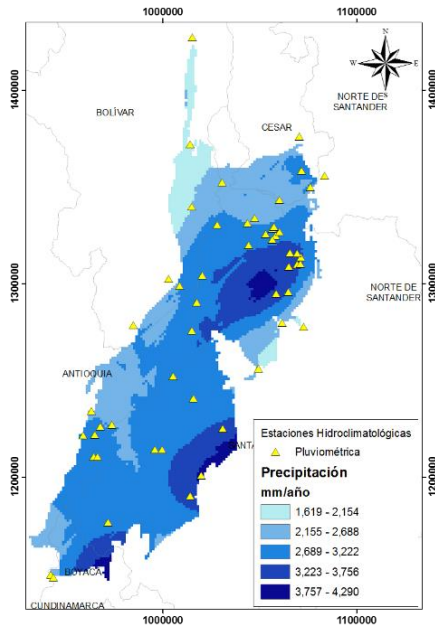
Figura 1-2 Subzonas hidrográficas ubicadas en el SAVMM



Escala 1:980.000 (modificado de IDEAM 2016)

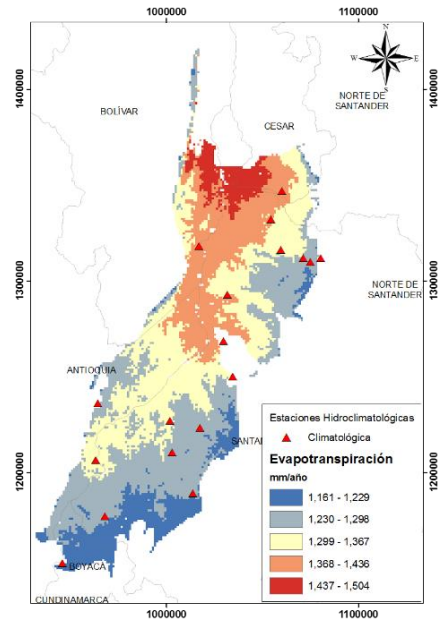
Figura 1-3. Distribución espacial del balance hídrico de la zona del SAVMM

a)



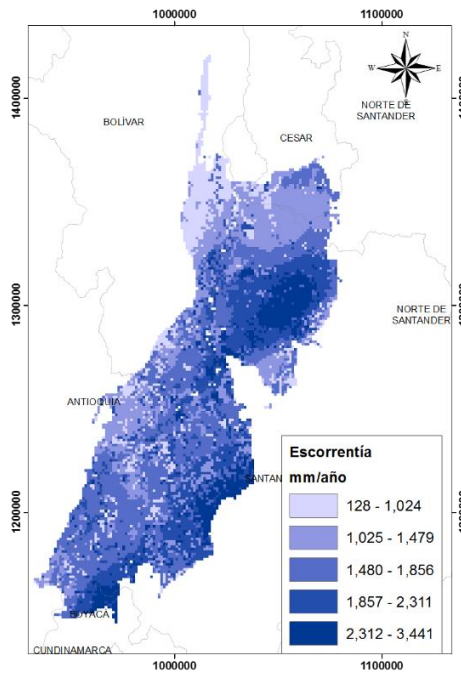
Escala 1:980.000 (modificado de IDEAM 2014a)

b)



Escala 1:980.000 (modificado de IDEAM 2014a)

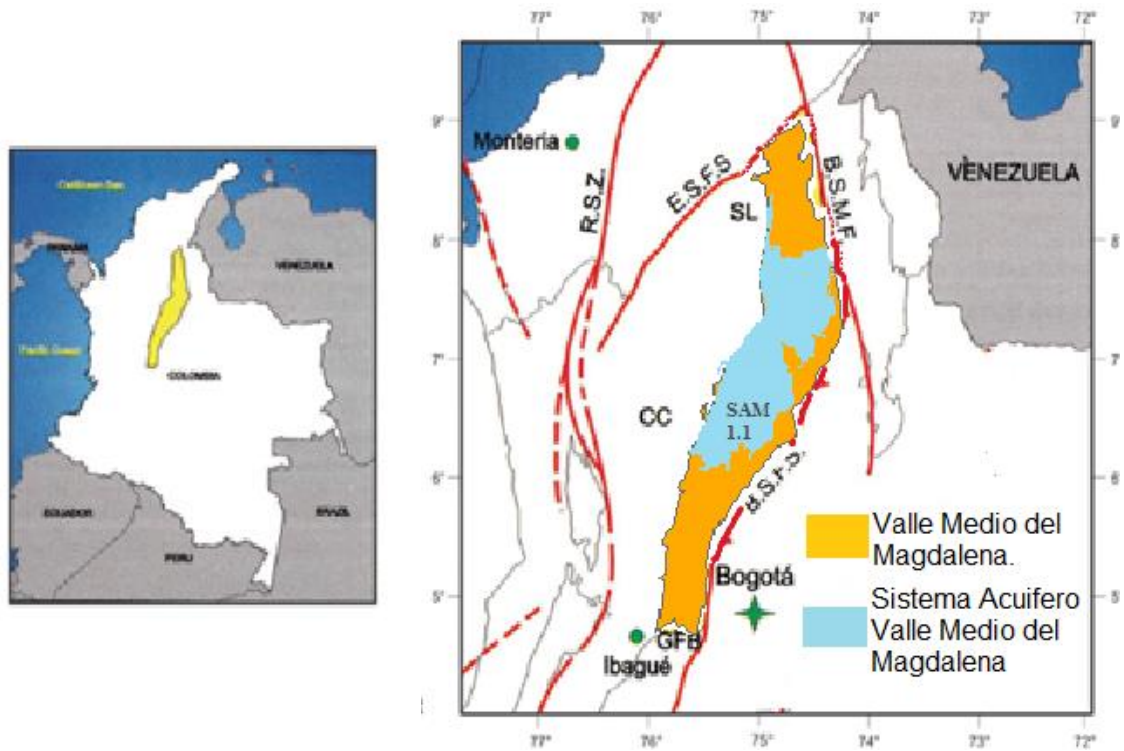
c)



Escala 1:980.000 (modificado de IDEAM 2014a)

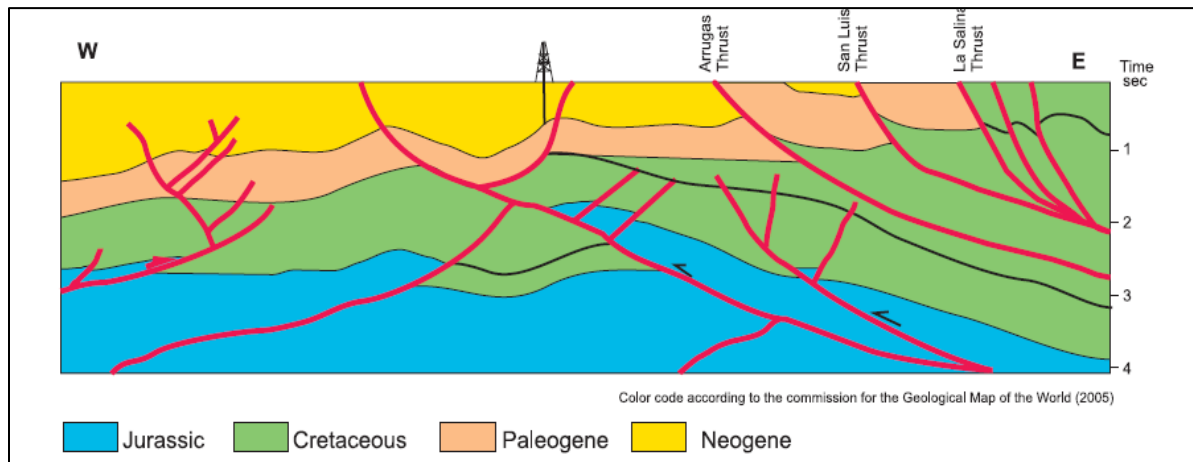
a) Mapas de isóneas de la precipitación del SAVMM b) Mapa de isóneas de la evapotranspiración potencial del SAVMM c) Mapa de isóneas de la escorrentía del SAVMM

Figura 1-4. Delimitación estructural de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena



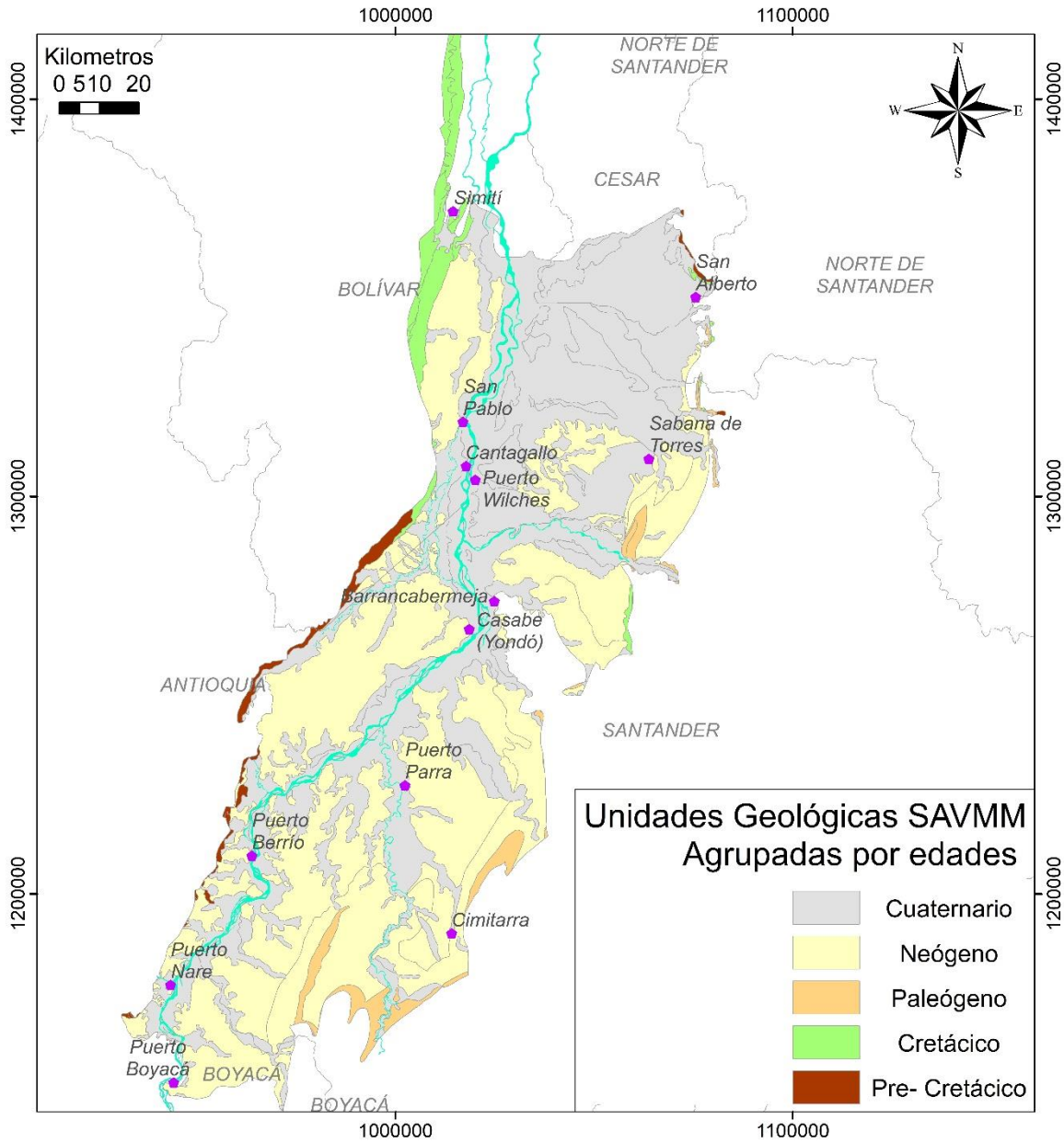
Fuente: ANH, Colombia 2007, Modificado.

Figura 1-5. Corte transversal generalizado de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena



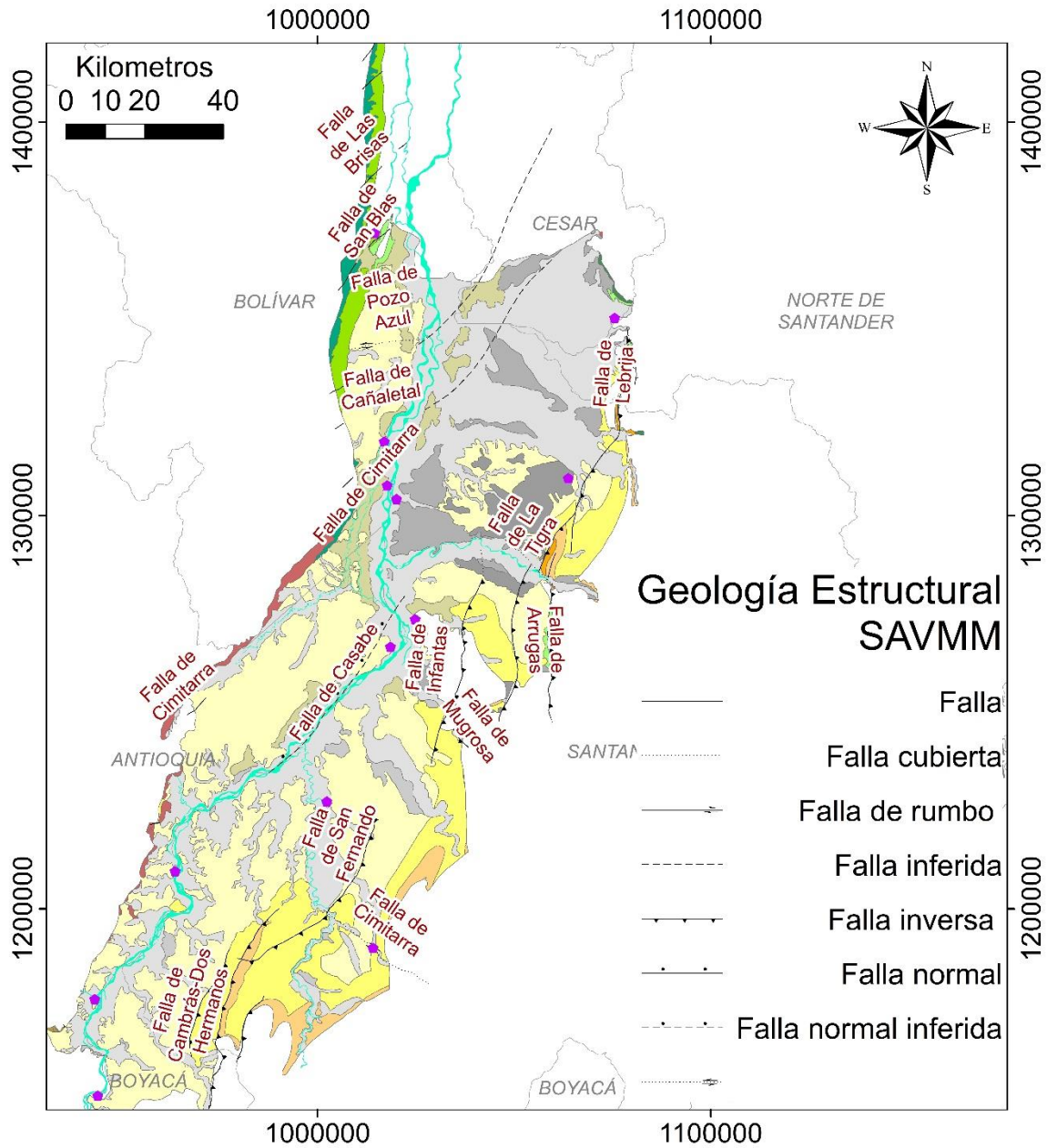
Fuente: ANH, Colombia 2015

Figura 1-6. Mapa Geológico Generalizado del Sistema Acuífero Valle Medio del Magdalena



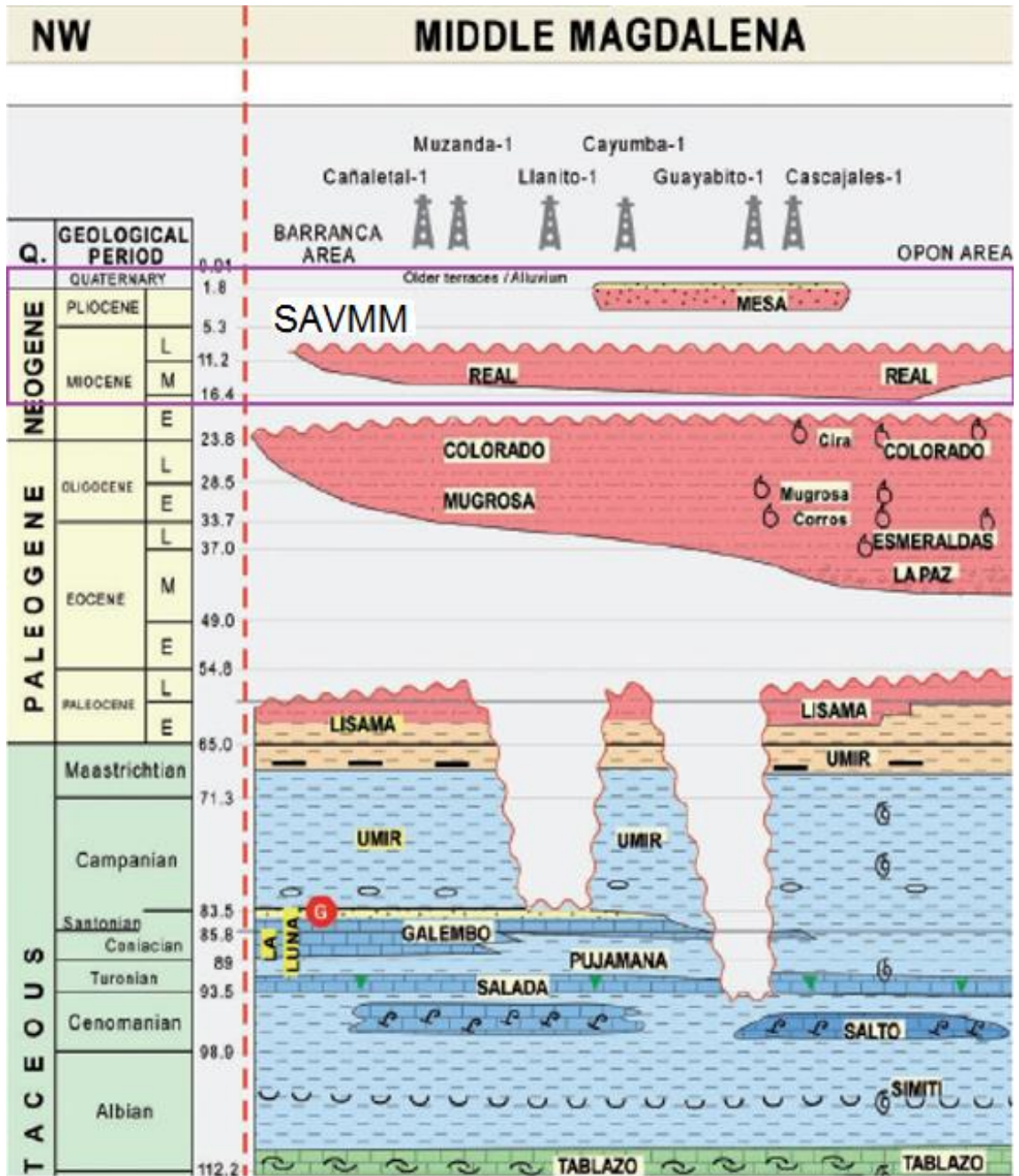
Escala 1:980.000 (modificado de IDEAM 2014a)

Figura 1-7. Mapa de la geología estructural del sistema acuífero del VMM SAVMM



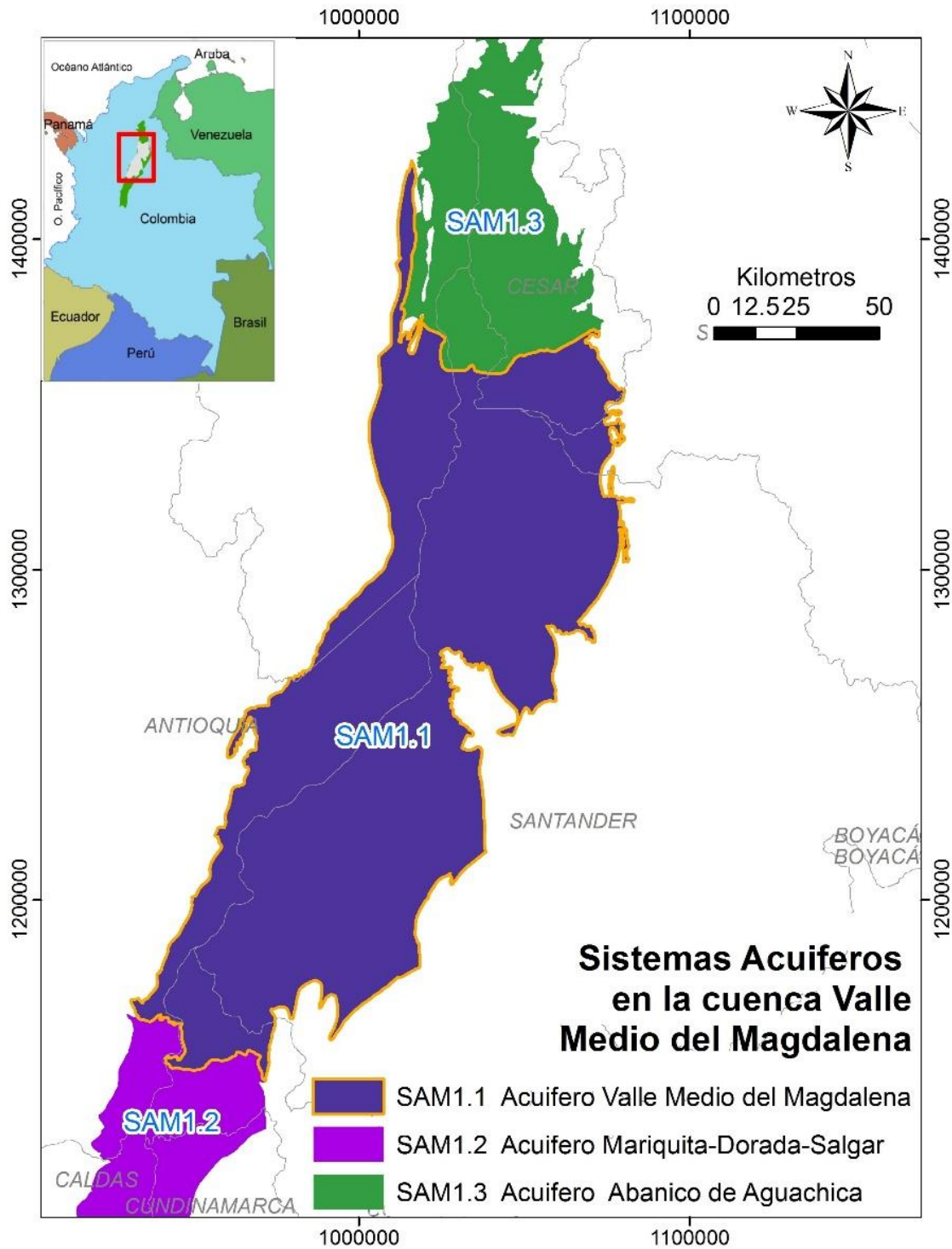
Escala 1:980.000 (modificado de IDEAM 2014a)

Figura 1-8. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena



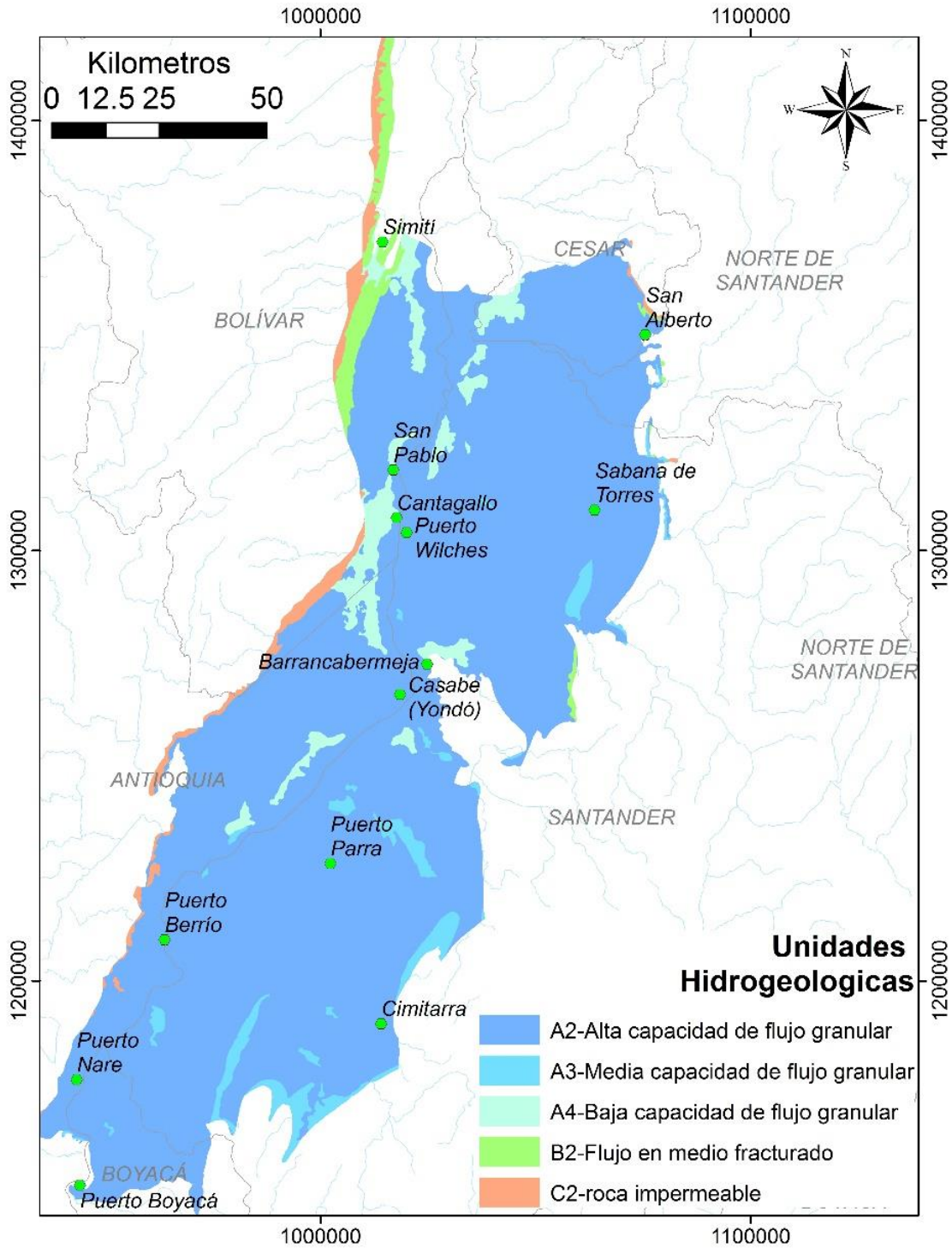
Fuente: Modificado ATG 2015

Figura 1-9. Localización del sistema acuífero SAVMM Valle Medio del Magdalena



Escala 1:1.290.000 (modificado de IDEAM 2014a)

Figura 1-10. Unidades hidrogeológicas en el Sistema Acuífero Valle Medio el Magdalena



Escala 1:980.000 (modificado de IDEAM 2014a)

Tabla 1-1. Características del sistema acuífero en la provincia hidrogeológica del Valle Medio del Magdalena,

Provincia Hidrogeológica	Código	Sistema Acuífero	Unidad Hidrogeológica	Tipos de acuíferos	Parámetros Hidráulicos	
PM1 Valle medio del Magdalena	SAVMM	Valle Medio del Magdalena	Acuífero Terrazas del Río Magdalena, Acuífero depósito aluvial del Río Magdalena, Acuífero Mesa, Acuífero Real, Acuífero La Luna, Acuífero Rosablanca y Tablazo	Libre, semiconfinados a confinados y cársticos	B=80 a >800 m, K=5-12 m/d	T=150-280 m ² /d, S=4.0- $\times 10^{-4}$ – 6×10^{-4} Cs=1-2 l/s/m

B: Espesor saturado, K: Conductividad hidráulica, T: Transmisividad hidráulica, S: Coeficiente de almacenamiento, Cs: Capacidad específica: tomada de [IDEAM, 2014b]

Tabla 1-2. Resumen de las unidades hidrogeológicas presentes en SAVMM

Edad	Formación	Litología	Tipo de Acuífero	Comportamiento Hidrogeológico	Clasificación Hidrogeológica
Cuaternario	Depósitos aluviales recientes	Compuestos por gravas, conglomerados, arenas cuarzosas, en una matriz areno-arcillosa, con intercalaciones de arcillolitas.	Acuífero libre	Sedimentos y rocas con flujo intergranular	A2
	Depósitos fluvio-lacustres	Constituidos por arenas de grano fino a medio, mientras que los asociados a las ciénagas son más arcillosos, con materia orgánica.	Acuífero libre a semiconfinado multicapa. Acuicludo	Sedimentos y rocas con flujo intergranular	A4
	Abanicos aluviales	Varían desde facies de arenas muy finas a gruesas y dependiendo el nivel de energía del transporte se pueden encontrar sedimentos de mayores tamaños, como gravas	Acuífero libre a semiconfinado multicapa	Sedimentos y rocas con flujo intergranular	A2
	Terrazas y depósitos coluviales	Están constituidos por arenas, gravas, limos, arcillas y bloques de hasta un metro de diámetro	Acuífero libre a semiconfinado multicapa	Sedimentos y rocas con flujo intergranular	A3
Paleógeno-Neógeno	Mesa	Areniscas y sedimentos de tamaño medio a grueso	Acuífero libre a semiconfinado multicapa	Sedimentos y rocas con flujo intergranular	A2
	Real	Arenicas y conglomerados cuarzosos localmente líticos	Acuífero libre a semiconfinado multicapa	Sedimentos y rocas con flujo intergranular	A2
	Colorado	Arenitas de grano fino a grueso, incluso conglomeráticas, con intercalaciones de diversa potencia de arcillolitas.	Acuífero libre a semiconfinado multicapa	Sedimentos y rocas con flujo intergranular	A3
	Mugrosa	Areniscas de grano fino a medio, color gris, con intercalaciones de shales grises y azules	Acuífero libre a semiconfinado multicapa	Sedimentos y rocas con flujo intergranular	A3

Edad	Formación	Litología	Tipo de Acuífero	Comportamiento Hidrogeológico	Clasificación Hidrogeológica
	Esmeraldas	Areniscas grises y verdosas de grano fino con intercalaciones de limolitas y arcillolitas abigarradas	Acuífero libre a semiconfinado multicapa	Sedimentos y rocas con flujo intergranular	A3
	La Paz	Areniscas de color gris claro con estratificación cruzada y conglomerados lenticulares	Acuífero libre a semiconfinado multicapa	Sedimentos y rocas con flujo intergranular	A3
	Lisama	Areniscas con intercalaciones locales de lodolitas	Acuífero libre a semiconfinado multicapa	Sedimentos y rocas con flujo intergranular	A3
Cretácico	La Luna	Lodolitas calcáreas, grises, fosilíferas, laminadas, con nódulos de micritas	Acuífero kárstico, Acuícludo	Rocas con flujo a través de fracturas	B2
	Tablazo	Shales con yeso, cherts, calizas y arenitas.	Acuitardo kárstico, Acuícludo	Rocas con flujo a través de fracturas	B2
Paleozoico	Batolito de Segovia y Formación Norean y Bocas	Mármoles esquistos y cuerpos intrusivos	Acuífugo	Rocas con ningún recurso de agua subterránea	C2

2. Metodología

La metodología consistió en la recopilación de las caracterizaciones fisicoquímicas disponibles en las diferentes entidades gubernamentales y privadas ubicadas en el área de estudio, posteriormente se verificó la calidad de los datos, realizando el balance iónico y considerando para esta investigación aquellas muestras con un error analítico menor o igual al 10% [Hounslow, 1995]. El análisis de los datos se realizó utilizando métodos gráficos, estadísticos descriptivos y multivariados que incluyó un Análisis de Componentes Principales (ACP) y un Análisis de Agrupamiento Jerárquico (AAJ), que junto con una correlación de la geología e hidrogeología de la zona se utilizaron para identificar los principales procesos geoquímicos que determinan la calidad y composición del agua subterránea en el SAVMM.

2.1 Selección y descripción de las muestras

Para este estudio se recopilaron las caracterizaciones fisicoquímicas disponibles en los Estudios de Impacto Ambiental (EIA), Planes de Manejo Ambiental (PMA) e Informes de Cumplimiento Ambiental (ICA), presentados ante la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), por parte de las empresas interesadas en desarrollar proyectos de exploración y producción hidrocarburos en la cuenca del Valle Medio del Magdalena. También se contó con las caracterizaciones fisicoquímicas que recopiló el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), para el desarrollo del Estudio Nacional del Agua (ENA) 2014, las cuales también fueron recopiladas de proyectos de hidrocarburos. Con base en el proceso de recopilación, se creó una base de datos hidroquímicos del Valle Medio del Magdalena (BDHVMM). En total se recopiló la información de 84 proyectos licenciados, de los cuales 56 tenían información útil para el desarrollo del presente estudio.

Las fuentes de los datos, el número de puntos de agua, de caracterizaciones por punto y de caracterizaciones que cumplen con los estándares de calidad para ser utilizadas en este estudio se presentan en la Tabla 2-1.

El trabajo de procesamiento de la información quedó registrado en el sitio web de libre consulta HydroVisor ASVAMM (Agua Subterránea del Valle Medio del Magdalena) >><https://sites.google.com/site/invhidrovm/ubicacion/home><<, sitio web creado con el fin de compartir la información compilada con las entidades públicas, privadas y el público en general que la requiera, con el fin de aportar al conocimiento hidrogeoquímico del SAVMM. En total se recopilaron 2.207 caracterizaciones incluyendo muestras temporales (muestras recogidas en un período de tiempo diferente en el mismo lugar). Posterior al análisis de calidad (ver más abajo para mayor discusión), la base de datos quedó finalmente conformada por 140 muestras, lo que conllevó a acotar el área de estudio de la Cuenca al SAVMM (Figura 2-3). En el caso de múltiples muestras pertenecientes a la misma localización, los datos de las muestras más recientes o más completas fueron las consideradas para el análisis estadístico.

En el procesamiento de la información compilada se encontraron reportados 92 parámetros hidroquímicos diferentes, en muchos casos estas variables no dan información útil de la calidad del agua subterránea, por ejemplo, se encontró reporte de cloro residual (parámetro exclusivo de agua potable), y el reporte de parámetros que se encontraban por debajo de los límites de detección o no eran descriptivos del estado y calidad del agua subterránea. En la Tabla 2-2 se relacionan las variables encontradas, lo cual evidenció la falta de estandarización nacional en los requerimientos específicos para la caracterización fisicoquímica del agua subterránea.

Para el análisis estadístico de la información se utilizaron 12 parámetros: conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), pH, Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Fe total, Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y NO_3^- , dado que su análisis provee información útil acerca de los procesos que controlan el agua subterránea en el área de estudio [Güler *et al.*, 2002]. Para el análisis estadístico multivariado se tuvo en cuenta la CE y los SDT, como parámetros suplementarios, que de alguna forma resumen la información del resto de parámetros, dado que su valor indica en cierta medida la concentración de los otros 10 parámetros. Por lo tanto, si estos parámetros que resumen la información, son contemplados en el análisis

multivariado, el método concentrará toda su atención en ellos y esto dificultará que el método muestre información relevante sobre el resto de parámetros [Güler *et al.*, 2002].

2.1.1 HidroVisor ASVAMM

El proceso de adquisición, consulta y procesamiento de la información fue un procedimiento laborioso dado la dispersión de la información (entre las entidades públicas y privadas), el volumen de información recolectada y el formato en el que esta estaba disponible (medio magnético y físico). La información consultada quedó registrada en el sitio web de libre consulta “HidroVisor-ASVAMM”¹ (Agua Subterránea del Valle Medio del Magdalena) >><https://sites.google.com/site/invhidrovm/ubicacion/home><< (Figura 2-1). Esta herramienta tecnológica fue creada con el fin de compartir la información con las entidades públicas, privadas y el público en general que la requiera, con el fin de aportar al objetivo de aumentar el conocimiento de la hidrogeología del Sistema Acuífero del Valle Medio del Magdalena.

La información compartida en esta página corresponde a la descripción de la zona de estudio (Cuenca del Valle Medio del Magdalena), se relaciona el inventario de fuentes de agua subterránea (aljibes, manantiales, pozos y piezómetros) y sus atributos fisicoquímicos y microbiológicos (en caso de que el punto georreferenciado cuente con dicha información).

El HidroVisor está conformado por 6 capas georreferenciadas y son:

1. Provincia hidrogeológica del VMM.
2. Sistemas acuíferos de la provincia hidrogeológica del VMM.
3. Yacimientos no convencionales (YNC)
4. Yacimientos convencionales (YC).
5. Fuentes de Agua Subterránea sin Caracterizaciones Fisicoquímicas
6. Fuentes de Agua Subterránea con Caracterizaciones Fisicoquímicas

¹ El HidroVisor-ASVAMM es un sitio web producto de la ejecución del proyecto “Exploración y producción de hidrocarburos convencionales y no convencionales: El papel del agua en las diferentes etapas de producción”, desarrollado con la colaboración del semillero de investigación “HIDROAP” adscrito al Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia

En total en el inventario de puntos de agua subterráneo realizado se identificaron y georreferenciaron 4.577 puntos a lo largo de la cuenca (1.948 pozos, 1.679 aljibes, 521 manantiales, 400 piezómetros y 29 sin reporte), de dicho inventario 1.368 puntos de agua subterránea contaban con algún tipo de caracterización fisicoquímica, y de estos puntos se recolectaron 2.207 caracterizaciones incluyendo muestras temporales (muestras recogidas en un período de tiempo diferente en el mismo lugar). En la Figura 2-2 se visualiza la distribución geográfica de los puntos de agua subterránea identificados a lo largo de la cuenca del VMM.

2.2 Análisis de Calidad de los datos

Este estudio partió del principio que los datos cuentan con el aseguramiento y control de calidad en el momento de la recolección y análisis que los laboratorios hacen de las muestras, sin embargo, se examinaron los datos para verificar que las caracterizaciones compiladas contaban con la calidad pertinente para el desarrollo de esta investigación y se evidenciaron errores como: muestras con ubicaciones inciertas o con coordenadas invertidas, sin registro de profundidades, también unidades de medida inconsistentes (todos los valores de concentración se convirtieron a un formato mg/L), valores atípicos o caracterizaciones incompletas para las 12 variables consideradas. Los valores incompletos pueden hacer imposible el uso de técnicas gráficas para el análisis de la química del agua o limitar la calidad del análisis estadístico [Güler et al., 2002], razón por la cual se emplearon relaciones químicas para estimar los valores de datos faltantes [Fagundo y González, 2005]. La CE se calculó a partir de los valores reportados de SDT y viceversa, los valores de HCO_3^- faltantes se calcularon a partir de la alcalinidad. Para asegurar la calidad de las muestras compiladas se calculó el valor de error analítico del balance iónico [Freeze y Cherry, 1979], de manera que la suma de miliequivalentes de cationes debe ser igual a la suma de miliequivalentes de aniones, como se aprecia en la Ecuación 2-1.

$$\% \text{ de Error Analítico} = \frac{\sum \text{aniones} - \sum \text{cationes}}{\sum \text{aniones} + \sum \text{cationes}} * 100 \quad [\text{Ec. 2-1}]$$

Según Hounslow [1995] y Custodio y Llamas [2001], un error de equilibrio de carga menor o igual al 10 % se considera aceptable. Con base en este criterio, de las 2.207 caracterizaciones solo 140 cumplieron los requisitos de calidad. La ubicación y descripción de las muestras seleccionadas se pueden ver en la Figura 2-4c.

2.3 Análisis Estadístico Multivariado

El Análisis Estadístico Multivariado (AEM) es una herramienta implementada para el estudio del agua que permite la identificación de grupos distintivos de muestras de agua subterránea, así como las correlaciones entre sus parámetros [Cloutier et al., 2008]. El AEM se realizó utilizando el paquete estadístico FactoMineR [Husson et al., 2008], del programa R. [R Development Core Team, 2011]. El conjunto de datos utilizado para el AEM constituye una base de datos de 140 muestras por 12 parámetros 10 activos (pH, Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Fe total, Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y NO_3^-) y 2 suplementarios (CE y SDT). También se tuvo en cuenta la variable cualitativa tipo de punto (pozo, aljibe, manantial y piezómetro). Para el AEM los valores de concentración inferiores al límite de detección de los métodos analíticos, fueron sustituidos por la mitad del valor del límite de detección [Farnham et al., 2002]. El procedimiento adoptado para la preparación del conjunto de datos químicos se basa en el enfoque utilizado por Cloutier et al. [2008], en el cual los parámetros con altos coeficientes de asimetría que no seguían una distribución normal fueron normalizados [James et al., 2016] dado que el método estadístico asume la normalidad de los datos. Los parámetros pH, Mg^{2+} y HCO_3^- se conservaron en su estado original, mientras que una transformación logarítmica se realizó a los parámetros Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe total y SO_4^{2-} y una transformación de raíz cuadrada a los parámetros Cl^- y NO_3^- . Posteriormente, con el fin de eliminar el efecto de las diferentes magnitudes que presenta cada uno de los parámetros, los datos fueron estandarizados [Canavos, 1987], como se describe en la Ecuación 2-2.

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \mu_j}{\sigma_j} \quad [\text{Ec.2-2}]$$

Donde Z_{ij} es el valor estandarizado del parámetro j para la muestra i , X_{ij} el valor original de la muestra i en el parámetro j , μ_j el valor promedio del parámetro j y σ_j la desviación estándar del parámetro j . Esta operación deja todos los parámetros estandarizados a una distribución que tiene valor promedio 0 y desviación estándar 1, y se aplica para asegurar que cada variable tenga el mismo peso en el AEM.

Una vez que se obtuvo el conjunto de datos normalizado y estandarizado, se realizó un AEM utilizando el Análisis de Componentes Principales (ACP) y el Análisis de Agrupamiento Jerárquico (AAJ). El ACP, es una técnica estadística utilizada para descifrar patrones dentro de grandes conjuntos de datos [Farnham et al., 2003]. Para identificar los

patrones químicos que representan las muestras seleccionadas en este estudio, se utilizó una representación geométrica en donde cada muestra se representa como un punto en un sistema de ejes (en este estudio fueron 10 ejes que obedecen al número de parámetros activos). El valor de cada parámetro constituye la coordenada sobre cada eje, sin embargo, los puntos fueron representados en un plano (2 ejes) y aunque su interpretación es abstracta, preserva todas las propiedades de un plano cartesiano tradicional [Lebart *et al.*, 1995]. Observar esta representación es el objeto del ACP y esto se logra proyectando el conjunto de muestras sobre nuevos ejes y planos. La solución para todos los ejes se resuelve encontrando los valores propios y sus respectivos vectores propios asociados y ordenándolos de mayor a menor. Como resultado, se obtienen ejes llamados “componentes principales” o “factores” que resumen la información [Lang, 1990]. Los componentes seleccionados para este estudio fueron aquellos cuyo valor propio fue mayor a uno, ya que estos componentes explican la mayor parte de la varianza [Davis, 2002]. La interpretación geoquímica de los componentes determinados proporciona una visión de los principales procesos dominantes que pueden controlar la distribución de las variables hidroquímicas [Güler *et al.*, 2002]. En el presente estudio sólo los tres primeros componentes principales tuvieron valores propios superiores a uno.

Posterior al ACP, se realizó un AAJ, para identificar firmas químicas similares entre las muestras y así aglomerarlas en grupos. Para lograr grupos homogéneos, se combinaron dos métodos [Everitt *et al.*, 2011]: el método de Ward (clasificación jerárquica) y el método de centros móviles usando la distancia euclidiana (clasificación no jerárquica). Primero se realizó una clasificación jerárquica con el método de Ward y se construyó una gráfica en forma de árbol “dendograma” y como número sugerido de grupos, se generó una línea horizontal “línea fenotípica” que corto el dendograma en el número de grupos que determinó como óptimo local. Con este número de grupos entonces ahora el método no jerárquico de centros móviles asignó de manera óptima las muestras a cada centro de gravedad y comenzó su iteración hasta llegar a un óptimo absoluto. Para este estudio se definieron 6 grupos que representan la información química de las 140 muestras.

2.4 Análisis Gráfico

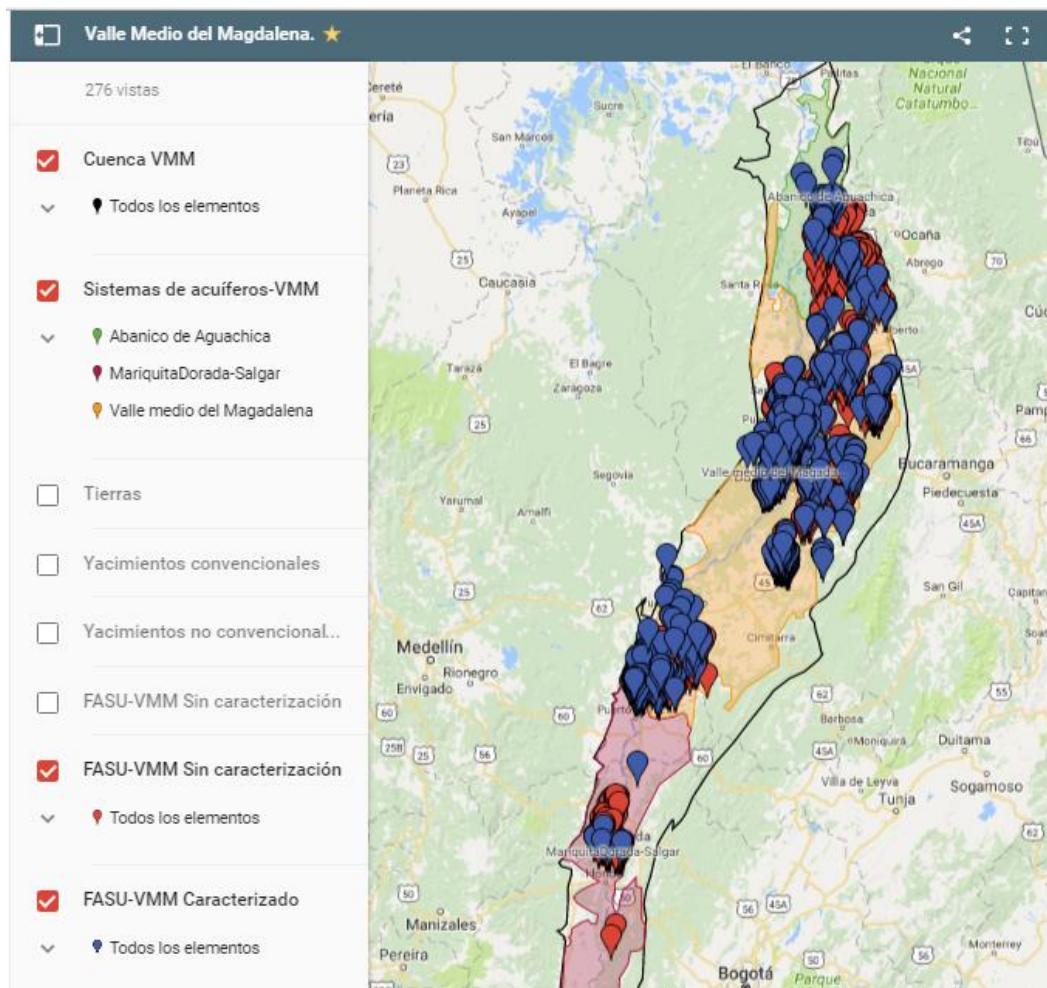
La comparación visual de la información hidroquímica del agua subterránea se realizó mediante métodos gráficos teniendo en cuenta el contenido de macro-componentes [Güler

et al., 2002]. Para este estudio se utilizaron los diagramas de Piper, Stiff y Gibbs usando el software libre Diagrammes [Simler, 2013]. El diagrama Piper [1944] es una de las técnicas de visualización más utilizadas para la exploración gráfica de los datos químicos del agua subterránea. La combinación de un diagrama ternario de la composición catiónica principal (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ y Mg^{2+}) y un diagrama ternario de la composición aniónica principal (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y NO_3^-) en un diamante central, lo convierten en una herramienta invaluable para identificar grupos o facies hidroquímicas e interpretar algunos procesos químicos que representa el conjunto de datos a analizar [Peeters, 2014]. Por otro lado en el diagrama de Stiff [1951], el contenido de iones es presentado por un polígono cuyo lado izquierdo describe el contenido de cationes mayores y el lado derecho, los aniones mayores. La distancia desde el eje central es proporcional a las concentraciones en (meq/L) de iones individuales. La ventaja de este patrón es que el agua de composición química similar tiene geometría de forma similar [Tikhomirov, 2016]. Por último se utilizó el diagrama de Gibbs [1970], para determinar qué proceso de los tres fundamentales que contempla el diagrama (la precipitación atmosférica, el dominio de la geología o el proceso de evaporación), determina la composición del agua subterránea en el área de estudio.

Figura 2-1. Portada del HidroVisor-ASVAMM

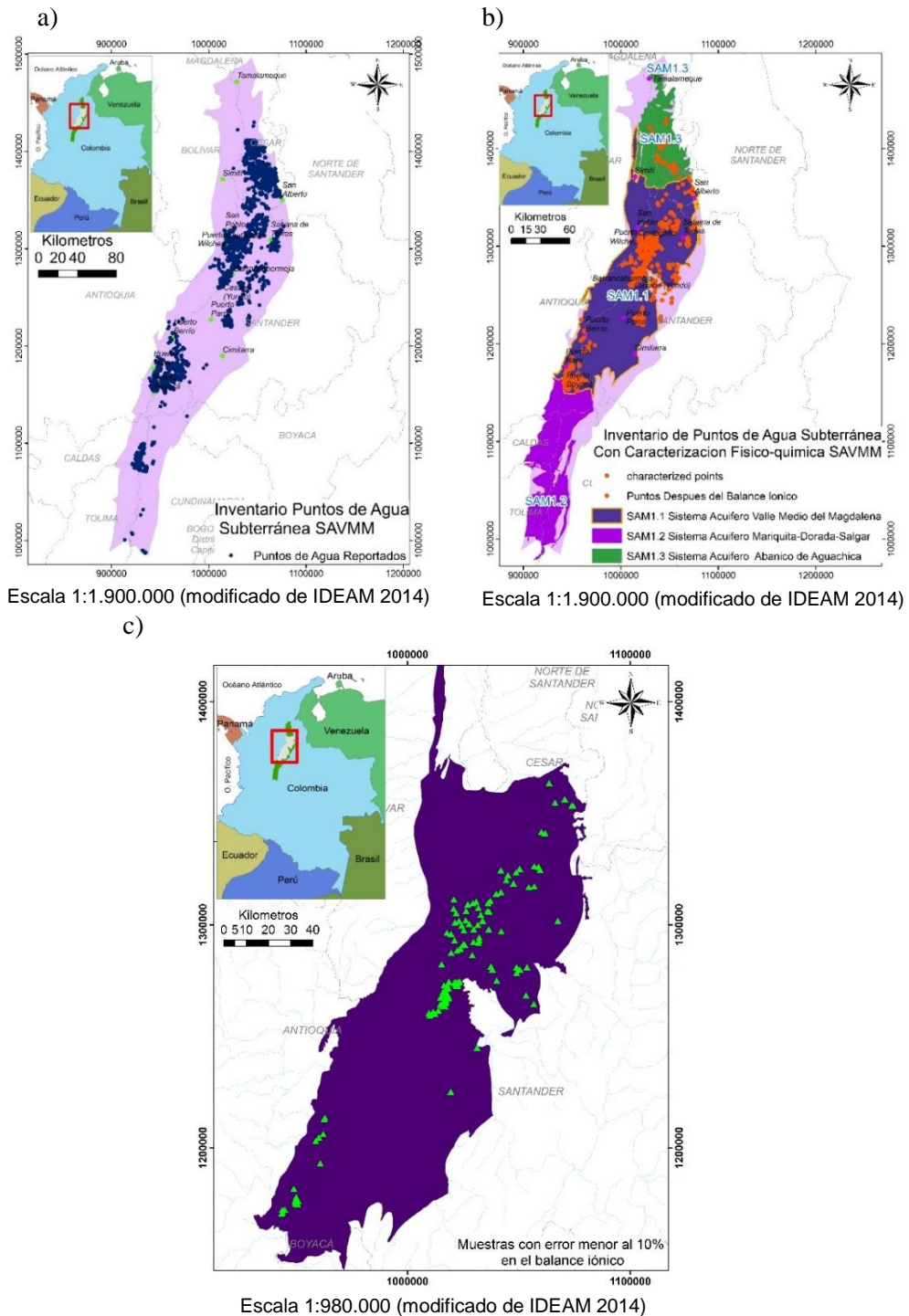


Figura 2-2. Visualización de los puntos de agua subterránea compilados en el HidroVisor ASVAMM.



Fuente: HidroVisor ASVAMM

Figura 2-3. Ubicación geográfica de los puntos de agua subterránea identificados en la cuenca del VMM



a) Distribución espacial de los 4.577 puntos de agua subterránea identificados en la cuenca del VMM b) Distribución espacial de las 2.207 caracterizaciones fisicoquímicas identificadas en la cuenca del VMM c) Distribución espacial de las 140 caracterizaciones utilizadas en el estudio ubicados en el SAVMM con un error analítico menor o igual al 10%.

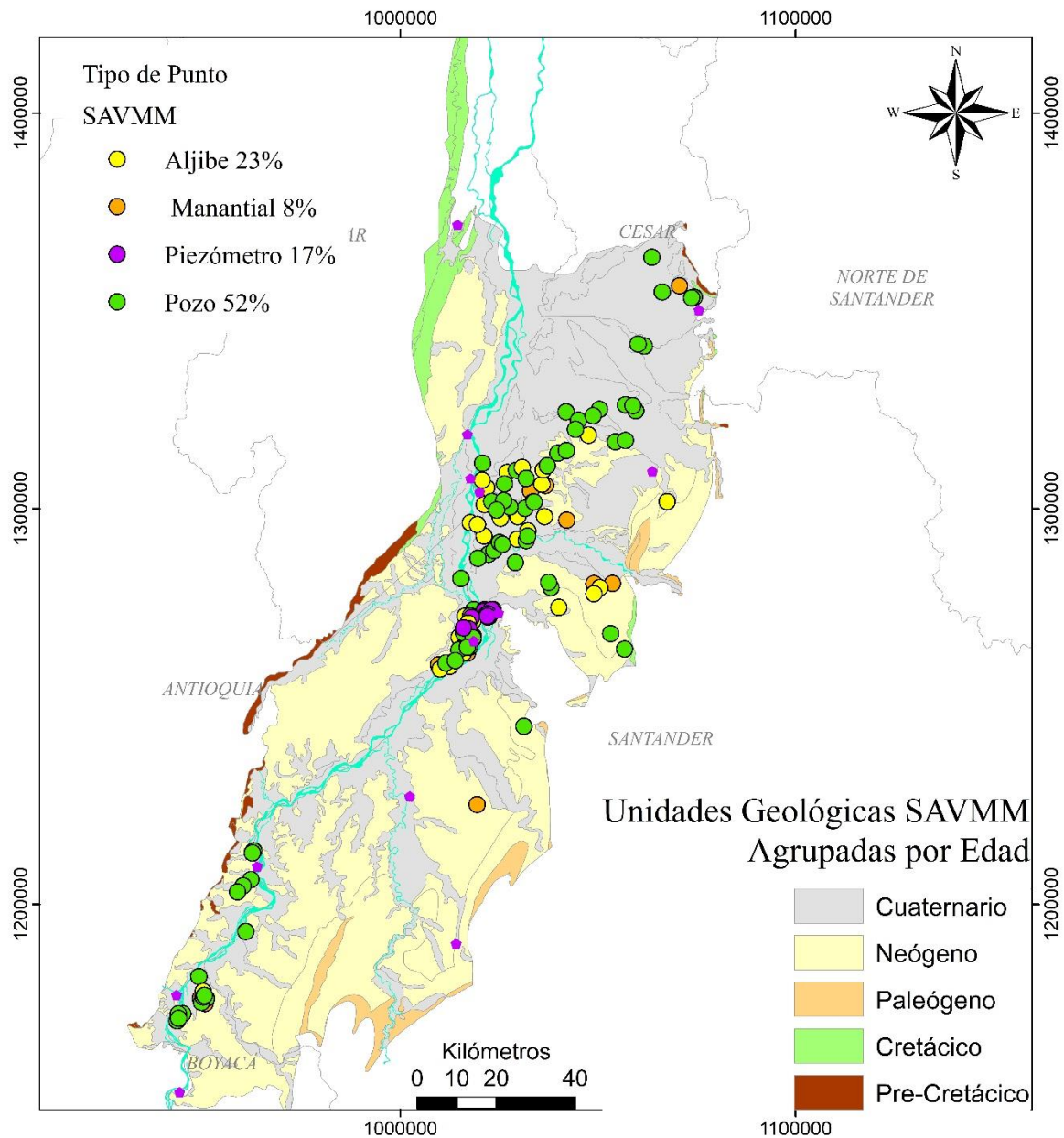
Figura 2-4. Distribución espacial, tipo de punto y representación temporal de las muestras

Tabla 2-1. Fuentes de datos utilizadas para conformar la base de datos hidroquímicos del Valle Medio del Magdalena BDHVMM.

Código	Expediente	Número de muestras			
		Número de puntos de Agua	Número de puntos de agua con caracterización	Número de caracterizaciones por punto de agua	Número de caracterizaciones que cumplen los estándares de calidad
1	LAM0037	192	29	29	25
2	LAM0040	39	3	7	—
3	LAM0180	153	130	455	16
4	LAM0203	4	1	2	—
5	LAM0232	15	15	15	—
6	LAM0242	65	16	23	—
7	LAM0332	156	34	34	—
8	LAM0855	497	381	436	30
9	LAM1009	420	56	100	1
10	LAM1277	128	16	25	—
11	LAM1470	2	2	2	—
12	LAM1913	61	33	95	4
13	LAM1994	65	26	71	10
14	LAM2199	49	3	4	—
15	LAM2249	513	78	353	1
16	LAM2317	178	45	79	9
17	LAM2762	1	1	1	—
18	LAM2903	1	—	—	—
19	LAM3090	44	13	13	—
20	LAM3176	3	—	—	—
21	LAM3410	4	—	—	—
22	LAM3435	1	1	1	—
23	LAM3539	4	—	—	—
24	LAM3654	2	—	—	—
25	LAM3846	39	3	3	—
26	LAM3856	3	—	—	—
27	LAM3857	9	9	9	—
28	LAM3965	201	181	181	6
29	LAM4083	11	—	—	—
30	LAM4109	2	2	2	—
31	LAM4120	3	—	—	—
32	LAM4236	6	—	—	—
33	LAM4241	15	—	—	—
34	LAM4304	41	9	10	6
35	LAM4644	11	2	2	—
36	LAM4717	36	8	8	—
37	LAM4767	1	1	2	—
38	LAM4783	69	10	10	—
39	LAM4816	102	14	19	5
40	LAM4852	46	4	4	—
41	LAM4861	5	—	—	—
42	LAM5237	59	6	6	—
43	LAM5278	29	5	5	—
44	LAM5279	201	8	8	5
45	LAM5282	153	7	7	—
46	LAM5318	27	—	—	—
47	LAM5353	206	36	4	—
48	LAM5771	33	3	3	—
49	LAV0001-13	28	—	—	—
50	LAV0006-15	112	12	12	11
51	LAV0007-14	148	12	12	8
52	LAV0008-12	55	6	8	2
53	LAV0031-14	2	—	—	—
54	LAV0033-14	192	20	20	—
55	LAV0061-14	2	2	2	—
56	NAFTAN	133	125	125	1
Total		4.577	1.368	2.207	140

*Fuente de datos: Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)

Tabla 2-2. Parámetros fisicoquímicos reportados en la información consultada

PARÁMETROS				
Generales	Iones Mayores	Metales y Metaloides		Otros
Acidez Total	Bicarbonatos	Aluminio	Amonio	Ortofosfatos
Alcalinidad Total	Calcio	Arsénico	Bacterias sulfato reductoras	Pesticidas Organoclorados
Carbono Orgánico Disuelto	Cloruros	Bario	Benceno	Pesticidas Organofosforados
Carbono Orgánico Total	Hierro	Berilio	Carbonato de Sodio Residual	Radón - 226
Color	Magnesio	Boro	Carbonatos	Relación de Absorción de Sodio
Conductividad eléctrica	Manganeso	Bromo	Cianuro Total	Sabor
Demanda Bioquímica de Oxígeno	Nitratos	Cadmio	Cloro Residual	Salinidad
Demanda Química de oxígeno	Nitritos	Cinc	Cloroformo	Salinidad efectiva
Dureza Cálcica	Potasio	Cobalto	Coliformes fecales	Salinidad potencial
Dureza Total	Sodio	Cobre	Coliformes totales	Solidos sedimentables
Fenoles	Sulfatos	Cromo	E Coli	Sulfuros
Grasas y Aceites		Cromo 6	Etil Benceno	Torio - 232
Oxígeno Disuelto		Estroncio	Fosfatos	Xileno
pH		Floruros	Fosforo Inorgánico	
Saturación de oxígeno		Litio	Fosforo Orgánico	
Solidos Disueltos Totales		Mercurio	Fosforo Total	
Solidos Suspendidos Totales		Molibdeno	Hidrocarburos Totales	
Solidos Totales		Níquel	Huevos de Helminto	
Temperatura		Plata	Material Flotante	
Tensoactivos SAAM		Plomo	Metano	
Turbiedad		Selenio	Nitrógeno Amoniacal	
Sílice		Vanadio	Nitrógeno Total Kjeldahl	
		Yodo	Olor	

3.Resultados y Discusión

Se determinaron los posibles procesos geoquímicos que controlan la calidad y composición del agua subterránea del SAVMM. Para ilustrar cuantitativa e integralmente los procesos geoquímicos identificados, se realizó un análisis estadístico descriptivo y multivariado mediante un ACP y un AAJ. Por medio del ACP se identificaron 3 componentes que explican el 59,4 % de la información y, por último, a través del AAJ se definieron 6 grupos que representan la información química de las 140 muestras utilizadas para este estudio. A continuación, se describe con detalle los resultados obtenidos.

3.1 Hidroquímica General del Agua Subterránea

De las 2.207 caracterizaciones fisicoquímicas recopiladas, 1.192 contaban con reportes para la variable temperatura, 1.044 para el pH y 1.152 para la conductividad eléctrica (CE), con esta información se construyeron mapas de isolíneas para el área de estudio. Dada la distribución espacial de los datos, la interpolación se realizó utilizando el método de Ponderación por Distancia-IDW (Inverse Distance Weighting).

La distribución espacial de temperaturas (Figura 3-1a) en un acuífero depende de la conductividad térmica e hidráulica del medio, de la relación longitud/profundidad de la cuenca, de la configuración del nivel freático y de la distribución de la temperatura ambiente respecto a las zonas de recarga y descarga entre otras [Custodio y Llamas, 2001]. Aunque la temperatura atmosférica promedio de la zona de estudio es de 25,6°C. Los rangos de temperatura registrados para el agua subterránea del área de estudio tienen una máxima de 36,8 °C y una mínima de 19,9 °C. Estos valores de temperatura pueden tener diferentes explicaciones, por un lado, algunos puntos con valores altos podrían estar relacionados con la actividad geotérmica de la zona conexas con algunas fallas existentes; puntualmente la anomalía positiva presente en el municipio de San Pablo coincide con el trazado de la falla de Cimitarra Figura 1-7. Existen zonas que tienen temperaturas inferiores a la

temperatura superficial promedio, estos puntos corresponden principalmente a niveles acuíferos someros como manantiales y pueden estar relacionados con tiempos cortos de residencia, ya que en esta zona se presentan procesos de recarga in situ por infiltración de agua lluvia [Domenico y Schwartz, 1998].

Para el área de estudio, el pH (Figura 3-1b) tiene un comportamiento medio ligeramente ácido con un valor de 6, en consecuencia, el agua tiene un mayor grado de agresividad facilitando los procesos de disolución (proceso geoquímico identificado). Los valores de pH para el área de estudio oscilarán entre 5.5 y 9.6 unidades. Uno de los principales factores que disminuye el pH en la zona de estudio son las actividades industriales que allí se realizan. La descarga de residuos líquidos con presencia de nitratos y sulfatos afecta las tasas de meteorización natural, y reduce la capacidad de atenuación de los suelos y rocas, provocando un incremento de la acidez del agua subterránea somera, especialmente en áreas con deficiencia de minerales carbonatados como los cuerpos cuaternarios fluviales que cubren el área de estudio. Dicho proceso puede evidenciarse en los cascos urbanos de municipios como Puerto Berrio, Puerto Wilches o Sabana de Torres donde se presentaron valores bajos para el pH. Por otra parte, se presentaron valores muy altos de pH en la zona sur del área de estudio, situación que debe ser investigada para poder determinar dicha anomalía.

La conductividad eléctrica (Figura 3-1c) indica la facilidad del agua para conducir la corriente [Custodio y Llamas, 2001] y es directamente proporcional a la cantidad de sales disueltas en el agua (iones disueltos). En general, las mediciones tomadas en el área de estudio tienen una tendencia normal, con valores de conductividad bajos, propios de unidades acuíferas con niveles freáticos someros y tiempos cortos de residencia, sin embargo, se evidencian zonas con altos valores, dichas anomalías se localizan en áreas de influencia de campos de producción petrolera que se desarrollan en el área de estudio. Estas observaciones apoyan la hipótesis de contaminación por cloruro antropogénico del agua subterránea en el área de influencia del Campo Casabe (discusión que se abordará con mayor detalle más adelante).

3.2 Estadística Descriptiva

Los resultados demuestran por sus concentraciones medias que los cationes Ca^{2+} , Na^+ y los aniones HCO_3^- y en una menor proporción el Cl^- dominan la composición química del

agua subterránea. Los valores máximos y mínimos de los cationes y aniones reflejaron el grado de heterogeneidad química del agua subterránea, debido al cambio dinámico entre los diferentes procesos geoquímicos presentes en el área de estudio. En la Tabla 3-1 se presentan los resultados del análisis estadístico descriptivo. La estimación del Coeficiente de Variación (CV) puede dar una valiosa información para determinar procesos de óxido-reducción [Kim et al., 2009]. Todos los parámetros excepto el pH (10%), tienen CV altos en especial el Fe total (294%), NO_3^- (229%) y SO_4^{2-} (164%). Los resultados del CV sugieren que estos parámetros se comportan como solutos no conservativos y por lo tanto sus concentraciones pueden ser modificadas por procesos de óxido-reducción que se presentan en el SAVMM.

La clasificación hidroquímica del agua subterránea se realizó según el catión y anión dominante [Tikhomirov, 2016]. Con base en el diagrama de Piper (Figura 3-2) se determinó que la facie hidrogeoquímica bicarbonatada cálcica es el tipo de agua dominante en el área de estudio. Estas muestras en su mayoría corresponden a los depósitos del cuaternario, lo que es coherente con agua subterránea poco profunda con tiempos cortos de residencia. Este tipo de agua representa agua de infiltración recientes y su firma química no es muy diferente del agua lluvia. El tipo de agua bicarbonatada sódica es también importante en la zona, ubicada en su mayoría en los depósitos de llanura aluvial del Río Magdalena, en los cuales se presentan procesos de disolución de silicatos. Los tipos de agua restantes son tipos de agua intermedios entre los mencionados anteriormente (Figura 3-2).

3.3 Análisis de Componentes Principales - ACP

Para este estudio se tomaron los tres primeros “componentes principales” cuyos valores propios fueron mayores que 1 [Davis, 2002], los cuales explican el 59,4 % de la varianza total en el conjunto de datos. Aunque la varianza acumulada para los tres componentes seleccionados no es alta, los resultados obtenidos pueden explicar con éxito las interrelaciones entre las variables. La carga para los tres primeros componentes y su respectiva varianza explicada se presentan en la Tabla 3-2. El componente principal 1 explica la mayor cantidad de la varianza 35,4% y se caracteriza por cargas altamente positivas de los iones Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} y HCO_3^- . Los parámetros presentes pueden indicar procesos de disolución de silicatos presentes en la zona, dado que los iones representados por este componente son débilmente retenidos por la estructura silicatada

por lo cual quedan fácilmente en solución. El componente principal 2 explica el 12% de la varianza total y está caracterizado por puntuaciones negativas, con altas cargas de SO_4^{2-} . Este componente está asociado a actividades antrópicas presentes en la zona de estudio (centros poblados y agroindustria). Por último, el componente principal 3 explica el 12% de la varianza total, y presenta altas cargas de Cl^- , probablemente de origen antropogénico. Esta condición parece estar asociada a una mala gestión del agua de producción (agua con elevada concentración de cloruro) derivadas de la actividad petrolera presente en el área de estudio. En el plano factorial conformado por los componentes 1 y 2 (Figura 3-3a) todas las correlaciones son positivas dado que ninguna flecha (parámetro) está en dirección opuesta de otra. El primer eje (componente 1) recoge la mayoría de la inercia y separa las muestras de izquierda a derecha. Por lo cual, al lado izquierdo del plano factorial (proyección de las muestras) están las muestras de agua más diluidas y al lado derecho las muestras más mineralizadas. Por esta condición se considera que el componente principal 1 representa los procesos de disolución (mineralización del agua). Las muestras menos mineralizadas se encuentran ubicadas en zonas de recarga del sistema acuífero y las más mineralizadas al interior de la cuenca y a mayores profundidades. Esta hipótesis es apoyada con la proyección de la variable cualitativa “tipo de punto” en el plano factorial. Los manantiales están al lado izquierdo donde hay fuentes menos mineralizados y los pozos y piezómetros corresponden a los más mineralizados ubicados al lado derecho (Figura 3-3b). El segundo eje (componente 2) separa las muestras de arriba abajo. Las muestras representadas arriba del plano factorial están caracterizadas por tener altas concentraciones de SO_4^{2-} y NO_3^- , esta condición es explicada por la actividad agroindustrial presente en la zona de estudio. Las muestras que se encuentran debajo del plano factorial presentan altas concentraciones de Fe total y bajas concentraciones SO_4^{2-} y NO_3^- . Se considera que hay un proceso de reducción de sulfatos y nitratos que por lo general conlleva a un aumento de las concentraciones de hierro disuelto [Custodio y Llamas, 2001]. Por lo cual, el componente principal 2 representa los procesos redox. Esta situación debe ser estudiada más a fondo mediante la medición del potencial redox [Villegas et al., 2013], lo que mejorará la comprensión de este proceso identificado en la zona de estudio.

3.4 Análisis de Agrupamiento Jerárquico - AAJ

La clasificación de las muestras utilizadas en grupos se basa en una observación visual del dendograma [Güler et al., 2002]. La posición de la línea fenotípica que cruza el

dendograma permitió la conformación de 6 grupos que resumen la información química de las 140 muestras iniciales (Figura 3-4a). Los valores promedio para cada parámetro revelan alguna tendencia entre los grupos identificados. A partir de los valores medios de las concentraciones de cada grupo se realizó un diagrama de Stiff (Figura 3-4b), que permitió identificar diferencias y similitudes entre cada grupo. En la Tabla 3-3 se resume la conformación de los 6 grupos.

Para los grupos 2, 3 y 4 el diagrama de Stiff presenta formas similares que se van ensanchando del grupo 2 al 4 con los iones Na^+ y HCO_3^- como dominantes. Por otra parte, el grupo 1 es el menos mineralizado y su forma corresponde a los iones dominantes Ca^{2+} y HCO_3^- . Los grupos 5 y 6 son los más mineralizados, observando que en el grupo 5 los iones dominantes son Na^+ , Ca^{2+} y HCO_3^- , y en el grupo 6 los iones dominantes son el Ca^{2+} , HCO_3^- y el Cl^- . Los resultados del AAJ son consistentes con los resultados del ACP. Las muestras del grupo 1 están situadas en el lado medio-izquierdo del plano factorial y corresponden a las muestras menos mineralizadas en su mayoría manantiales (Figura 3-3c) mientras que las muestras de los grupos 5 y 6 están situadas en el lado derecho y corresponden a las muestras más mineralizadas en su mayoría conformadas por pozos y piezómetros. Las muestras de los grupos 2, 3 y 4 se encuentran en el centro del plano factorial y son las muestras con nivel intermedio de mineralización. En consecuencia, la distribución de las muestras en el plano factorial y de acuerdo con el círculo de correlaciones es, de la menos mineralizada, grupo 1 (lado izquierdo sentido contrario a las flechas del círculo de correlaciones) a las más mineralizada, grupo 6 (lado derecho y en dirección a las flechas del círculo de correlaciones) como se presenta en la Figura 3-3a. Dada la distribución geográfica de los datos existentes en el SAVMM, y los resultados obtenidos mediante la congregación de los grupos, no es posible determinar una evolución geoquímica del agua subterránea en función de su localización (Figura 3-5). Sin embargo, se identificó que el comportamiento de los grupos en función de la mineralización es explicado por en gran medida por la profundidad en las cuales fueron extraídas las muestras. Esta tendencia identificada, es validada a través del diagrama de dispersión presentado en la Figura 3-6. En este se evidencia que el aumento de la conductividad eléctrica está relacionado con el aumento de la profundidad a la cual fueron tomadas las muestras. El grupo 1 está conformado por muestras someras con tiempos cortos de residencia como manantiales y las muestras se ubica al extremo izquierdo inferior de la gráfica (muestras con valores bajos de CE y menos profundas), los grupos 2, 3 y 4 tienen

valores intermedios de CE a profundidades intermedias y el grupo 5 está conformado en su mayoría por pozos profundos (muestras más mineralizadas y extraídas a mayor profundidad). Para el grupo 6 se evidencia una anomalía dado que está conformado en su mayoría por piezómetros los cuales son puntos poco profundos, pero son los más mineralizados lo cual apoya la hipótesis de contaminación por Cl⁻ antropogénico aportado por la industria petrolera que se desarrolla a lo largo del área de estudio.

La condición descrita se puede ilustrar a través del diagrama de Gibbs [Gibbs, 1970], que muestra las concentración de SDT como una función de la relación $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$. En la Figura 3-7, se proyectan en el diagrama de Gibbs las muestras marcadas de acuerdo con su respectivo grupo. En su mayoría las muestras de agua subterránea caen principalmente en el dominio influenciado por la geología. Las muestras del grupo 1 se acercan más a la influencia del agua de lluvia que las muestras de los otros grupos, lo cual es consistente con las observaciones anteriores (Tabla 3-3). Las muestras de agua subterránea del grupo 1 podrían corresponder a agua de baja salinidad y recién infiltrada en zonas de recarga. Las muestras de los grupos 3, 4 y 5 están más influenciadas por las interacciones agua-roca. Estas muestras podrían representar dos procesos: el primero la disolución, dado que la composición del agua subterránea está regida por las características mineralógicas de los materiales geológicos en el área de estudio y el segundo puede ser un posible proceso de óxido-reducción debido a la atenuación natural del medio hidrogeológico. El diagrama también apoya la idea de contaminación por cloruro antropogénico lo cual se evidencia en las muestras del grupo 6.

3.5 Interpretación Geoquímica de los Grupos

Se realizó un análisis de cada grupo en función de las características geológicas e hidrogeológicas del área de estudio. En el análisis hidroquímico y en el ACP, se logró identificar que los procesos principales que definen la composición química corresponden: disolución - interacción del agua con silicatos, oxido-reducción – atenuación natural dado a la presencia de un ambiente reductor, y alteración antropogénica – contaminación por el desarrollo de actividades humanas que se realizan en la zona de estudio. El análisis de los grupos presenta consistencia con los procesos geoquímicos descritos.

El grupo 1 acopia el 27 % de las muestras, y se caracteriza por tener la concentración más baja de los iones objeto de estudio, por lo cual es agua que está ligeramente mineralizada con tiempos cortos de residencia. La composición química obedece a agua que está relacionada con la composición de agua meteórica que interactúa con los niveles acuíferos a través de la recarga natural [Ghesquière et al., 2015]. Para los grupos 2, 3 y 4 el diagrama de Stiff presenta formas similares con tendencia al ensanchamiento respecto a los iones dominantes Na^+ y HCO_3^- . Estos grupos están ubicados en unidades hidrogeológicas similares; cuerpos cuaternarios que componen el SAVMM (Figura 2-4), cuyos iones dominantes son el Na^+ , K^+ , y HCO_3^- . El enriquecimiento de estos iones puede darse debido a la dilución incongruente de la albita [Freeze y Cherry, 1979], plagioclasa sódica presente en los sedimentos cuaternarios del área de estudio. En presencia de ácido carbónico (que puede ser debido al pH ligeramente ácido registrado en el área de estudio), el agua disuelve la albita, poniendo en solución sodio, bicarbonato y ácido silícico, mientras deposita el mineral arcilloso denominado caolinita [Custodio y Llamas, 2001].

En los grupos 2, 3 y 4 también se evidencia un aumento en la concentración de K^+ , que puede ser debido a la acción erosiva ejercida por el agua sobre feldespatos potásicos presentes en el área de estudio como las Ortoclasas, las cuales están presentes en la matriz de los cuerpos cuaternarios y neógenos existentes en el área de estudio [L. Morales, 1958], reacción que al igual que la albita es una disolución incongruente y produce caolinita.

Por otra parte, 5 de las 35 muestras que conforman el grupo 5, presentan altas concentraciones de Na^+ (Figura 3-8a), lo que hace que la geometría del diagrama de Stiff para este grupo sea atípica. En general las muestras de este grupo tienen un enriquecimiento importante de Ca^{2+} , y se mantiene la tendencia del HCO_3^- como anión predominante. En su mayoría este grupo está conformado por pozos que captan agua de estratos más profundos con una mayor evolución geoquímica lo cual explica su mayor grado de mineralización. El principal proceso que determina la química del agua subterránea para este grupo es el proceso de disolución de silicatos, en este caso ricos en Ca^{2+} . El principal mineral que aporta Ca^{2+} y HCO_3^- , en el área de estudio puede ser la anortita la cual es más sensible a la erosión química que la albita [Deutsch y Siegel, 1997]. Otra fuente probable de Ca^{2+} puede ser la alteración de piroxenos o anfíboles. La disolución de estos silicatos se da en las primeras fases de la meteorización de las rocas

ígneas que conforman el basamento de la Cordillera Central y algunas rocas cristalinas de la Cordillera Oriental en el Macizo de Santander.

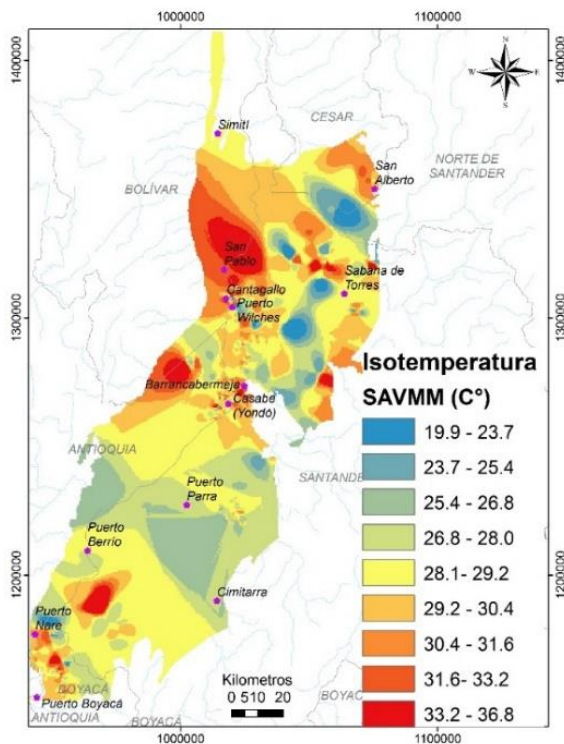
El grupo 6, presenta las concentraciones de SDT más altos dado que lo conforman las muestras más ionizadas, representado por los iones dominantes Ca^{2+} y Cl^- . El diagrama de Stiff para este grupo, presenta una geometría irregular que sugiere una alteración externa al sistema hidrogeológico del área de estudio. A diferencia de los demás grupos donde el grado de mineralización es en cierta medida función de la profundidad (a mayor profundidad más mineralizados), este grupo es representado en su mayoría por piezómetros los cuales son instalados en zonas que requieren un control regular el agua subterránea somera (poco profunda). Para este caso particular, los piezómetros fueron instalados para el monitoreo del agua subterránea en áreas licenciadas para la producción de hidrocarburos y en su mayoría están ubicados en el área de influencia del campo de producción petrolera Casabe (Figura 3-8b). A su vez, de las doce muestras que integran el grupo 6, ocho se ubican en el campo Casabe.

En la producción de petróleo se generan agua de producción, la cual se caracteriza por su alto grado de salinidad específicamente por tener altas concentraciones de Cl^- . La inadecuada gestión de estas agua es uno de los principales causantes de las contaminación de acuíferos, ya sea por derrames en superficie, fallas en el revestimiento de las piscinas de almacenamiento o por falta de integridad de los pozos inyectores destinados para la disposición final de esta agua [U.S.EPA, 2016]. En el Campo Casabe se generan cerca de 163.000 barriles de agua de producción por día [ANLA, 2015], la cual debe ser gestionada según lo considerado en la licencia ambiental. En la Figura 3-7 se identifican las muestras de este grupo que se encuentren por fuera de los dominios del diagrama de Gibbs debido a una alta relación de $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$. Estas observaciones indican que el aporte de Cl^- en el agua subterránea es de origen antropogénico [Montcoudiol et al., 2014]. Los resultados del diagrama de Gibbs y la relación positiva existente entre la ubicación de las muestras del grupo 6 y el aumento en la concentración de Cl^- en el agua subterránea, puede ser explicada por una posible falla en la gestión del agua de producción en el Campo Casabe. Esta situación debe ser estudiada con mayor detalle, más allá que la concentración media (57,5 mg/L) y máxima (123,6 mg/L) del Cl^- reportada estén por debajo del umbral establecido para agua potable (250 mg/L) en la normatividad nacional [2007], es necesario determinar si hay una posible contaminación

del agua subterránea por la actividad petrolera mediante monitoreos fisicoquímicos continuos del agua subterránea ubicada en el área de influencia del Campo Casabe. Se recomienda utilizar el enfoque propuesto por Paquette et al. [2017], para determinar la fuente de la salinidad identificada en el agua subterránea ubicada en el área de influencia del Campo Casabe.

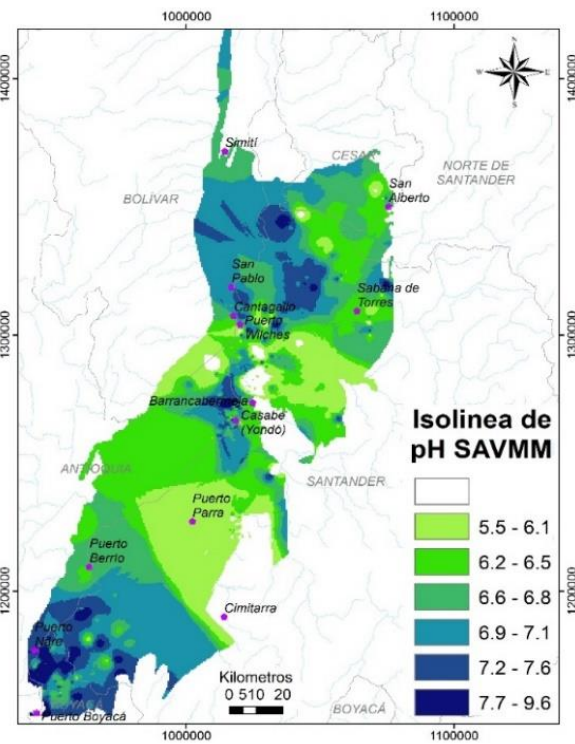
Figura 3-1. Mapas de Isolíneas para Temperatura, pH y Conductividad Eléctrica

a)



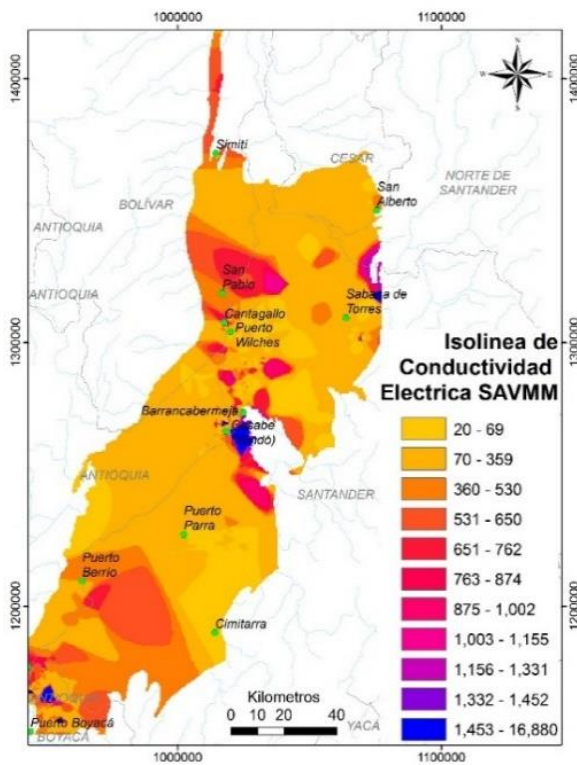
Escala 1:980.000 (modificado de IDEAM 2014)

b)



Escala 1:980.000 (modificado de IDEAM 2014)

c)



Escala 1:980.000 (modificado de IDEAM 2014)

Figura 3-2. Diagrama de Piper de acuerdo con los grupos establecidos a través del Análisis de Agrupamiento Jerárquico

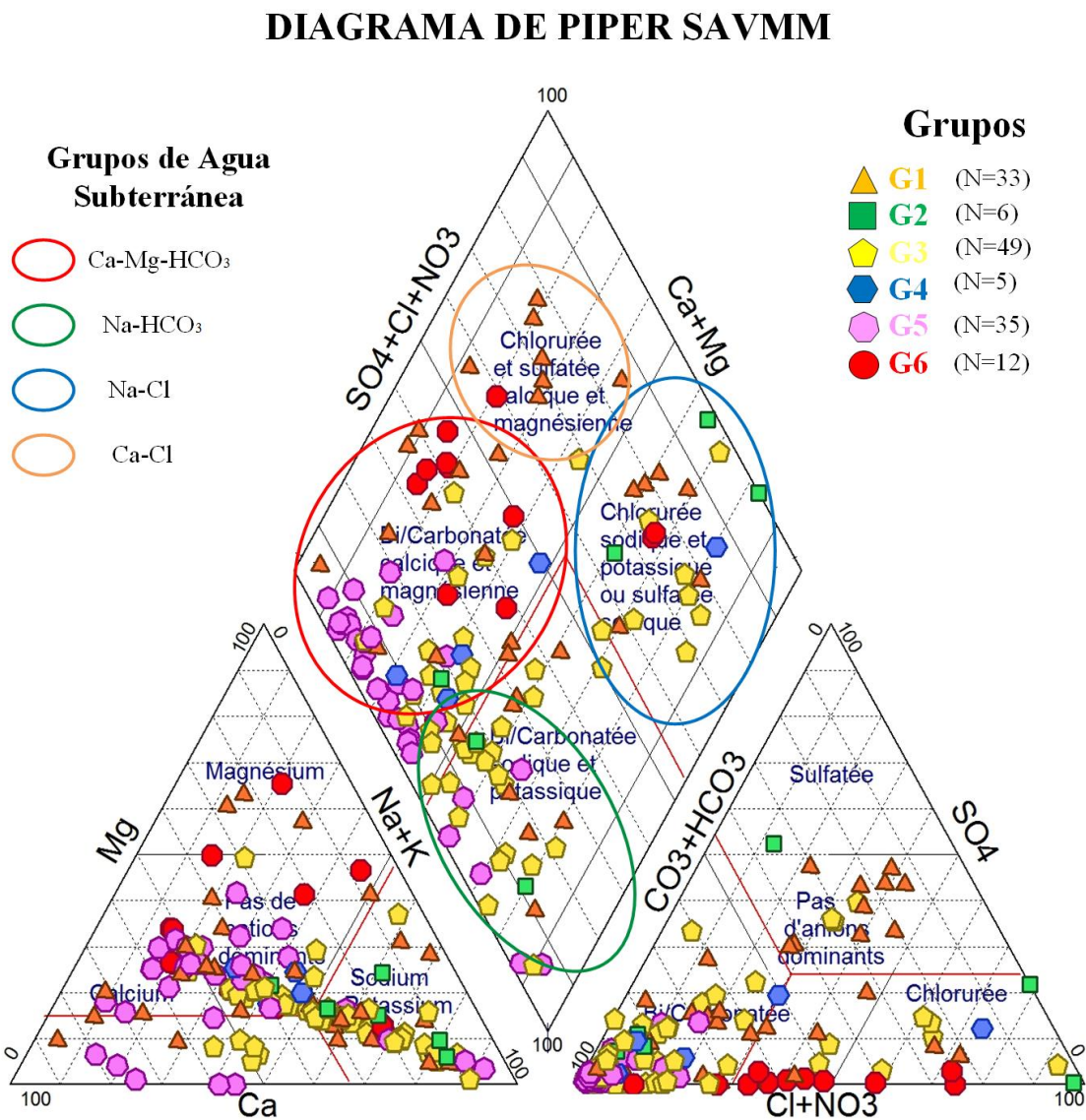
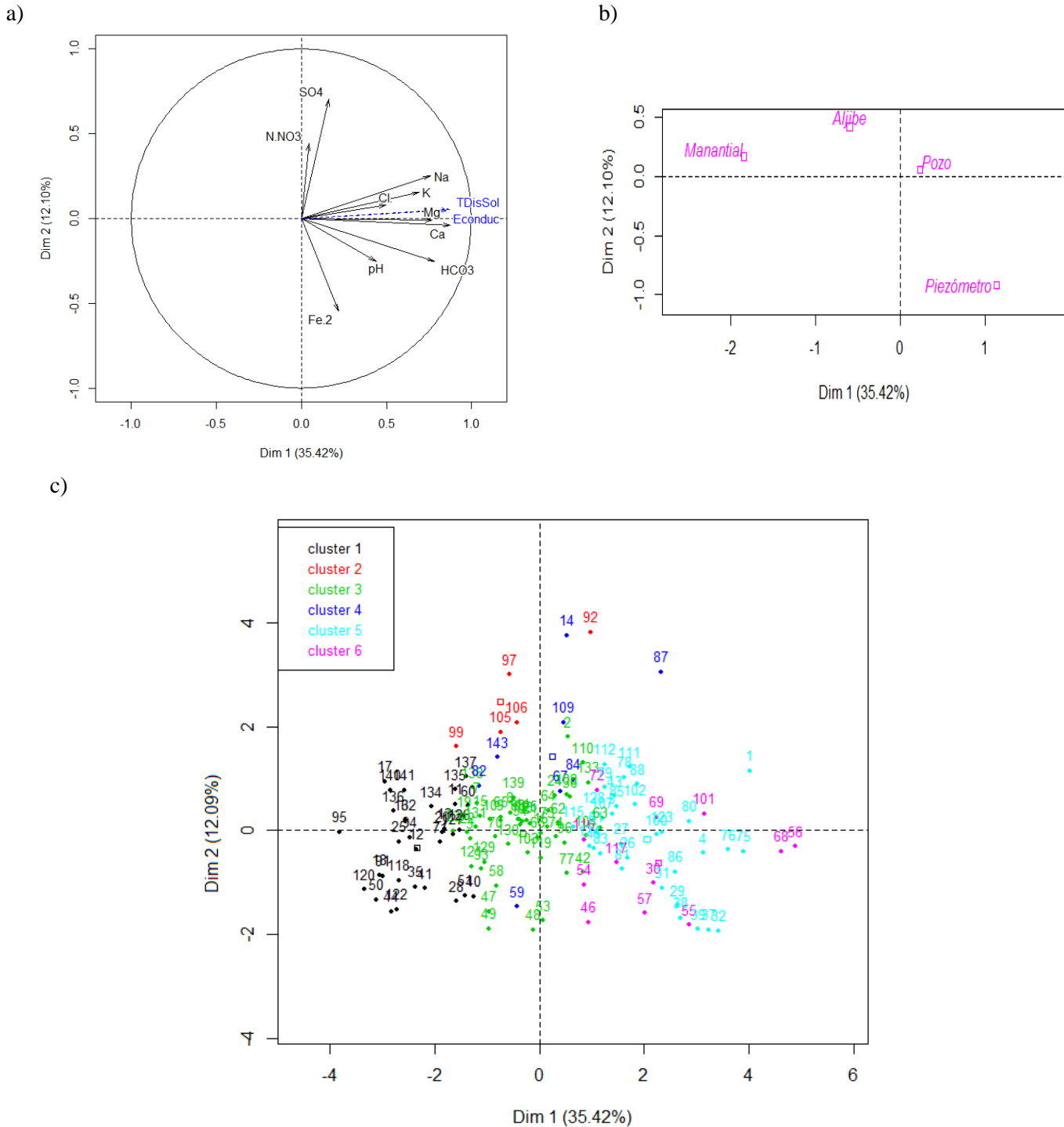
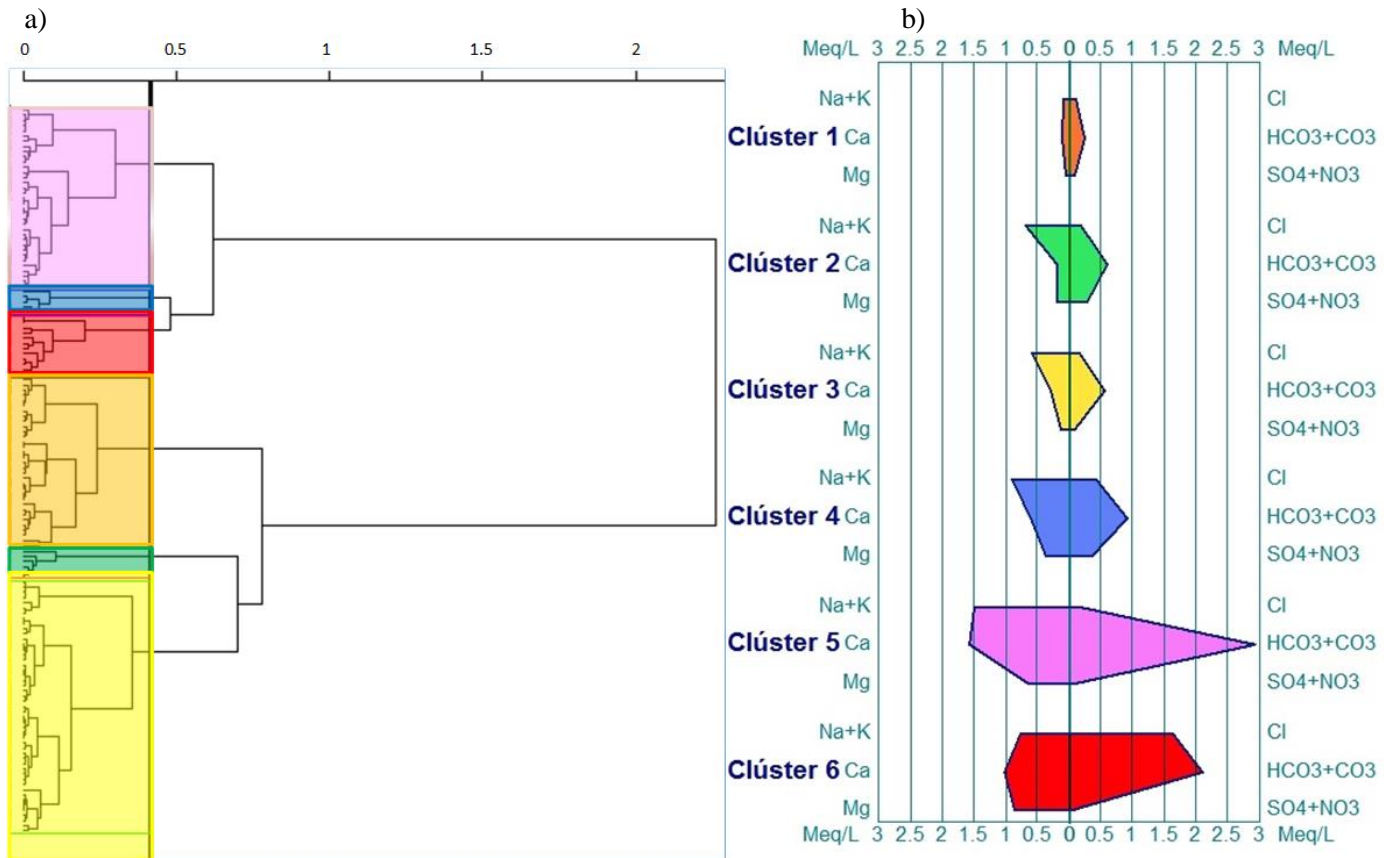


Diagrama de Piper de acuerdo con los 6 grupos establecidos a través del Análisis de Agrupamiento Jerárquico para las 140 muestras. En su mayoría las muestras se encuentran en los dominios de agua bicarbonatada cálcica y en una menor proporción para el agua de tipo bicarbonatada sódica y clorurada cálcica-sódica.

Figura 3-3. Proyección de los resultados del Análisis De Componentes Principales

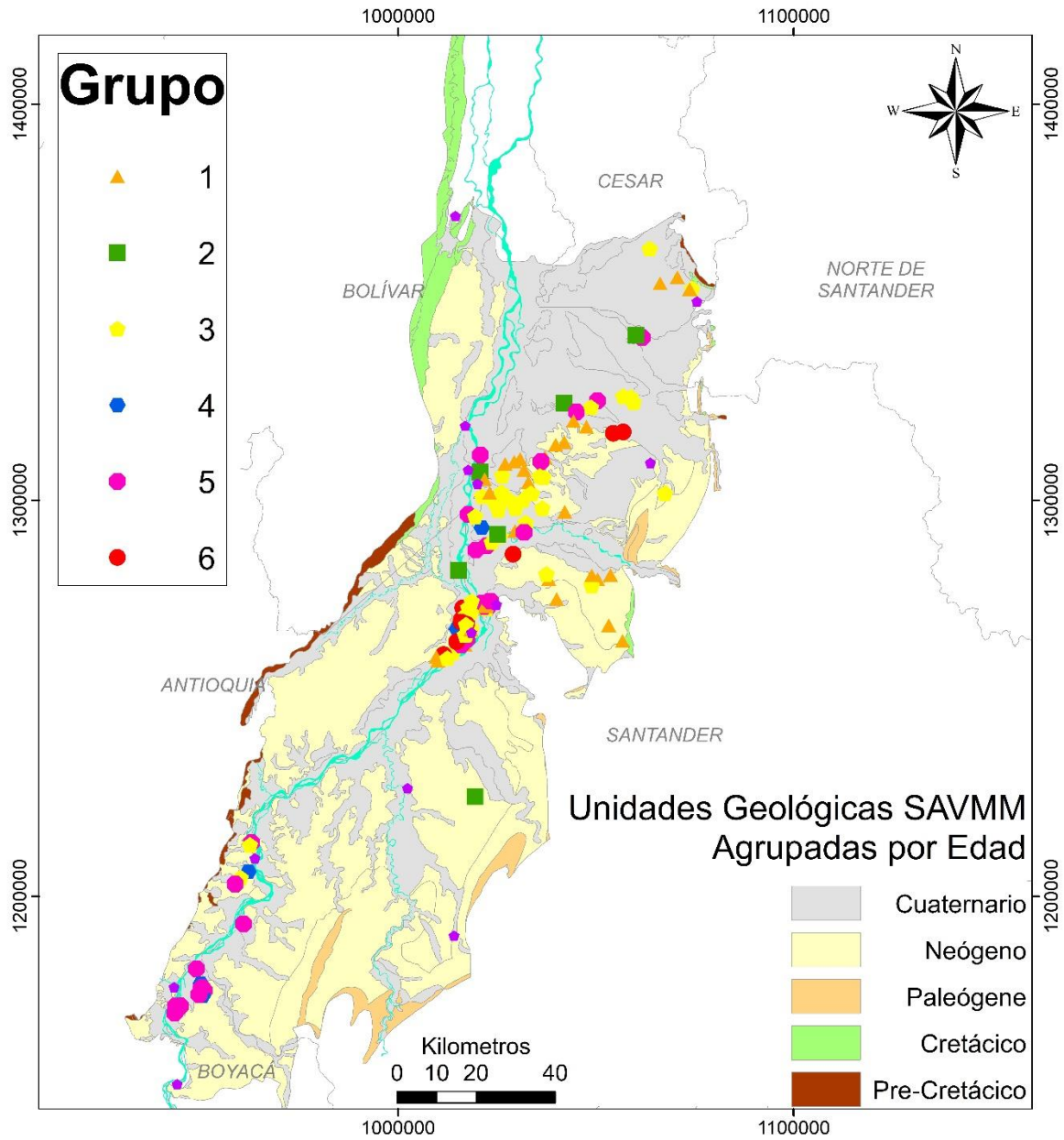
(a) Trazado de los parámetros en el círculo de correlaciones respecto a los componentes principales (dimensiones) 1 y 2. Las variables (parámetros) mejor representadas en este círculo son el HCO_3^- , Ca^{2+} y Na^+ dado que las flechas que los representan son las que más se acercan al borde de la circunferencia (b) Variable cualitativa proyectada en el plano factorial respecto a los componentes principales (dimensiones) 1 y 2 c) proyección de las 140 muestras de agua subterránea según resultados del Análisis de Agrupamiento Jerárquico en el plano factorial respecto a los componentes principales (dimensiones) 1 y 2

Figura 3-4. Resultados del Análisis de Agrupamiento Jerárquico

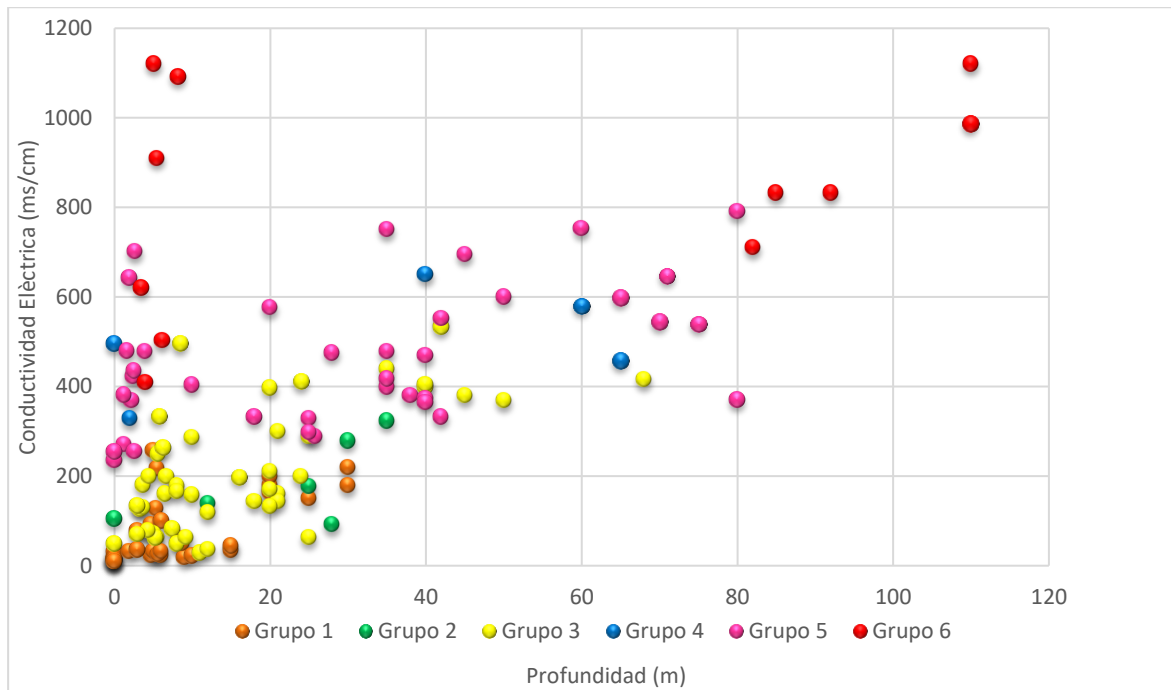


a) Identificación de los grupos en el Dendograma utilizando Ward y Centros Móviles b) Diagrama de Stiff que muestran la composición química media de los iones mayoritarios de cada uno de los 6 grupos derivados del AAJ.

Figura 3-5. Distribución espacial de las muestras de acuerdo con los resultados del Análisis de Agrupamiento Jerárquico

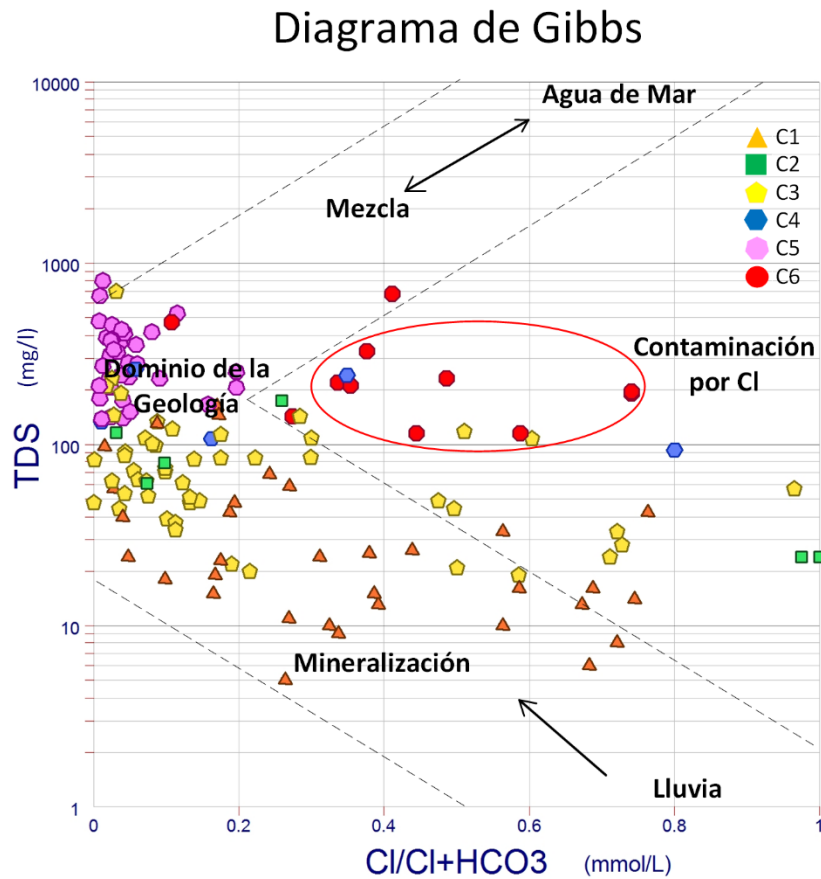


Escala 1:980.000 (modificado de IDEAM 2014)

Figura 3-6. Diagrama de dispersión Conductividad eléctrica Vs Profundidad

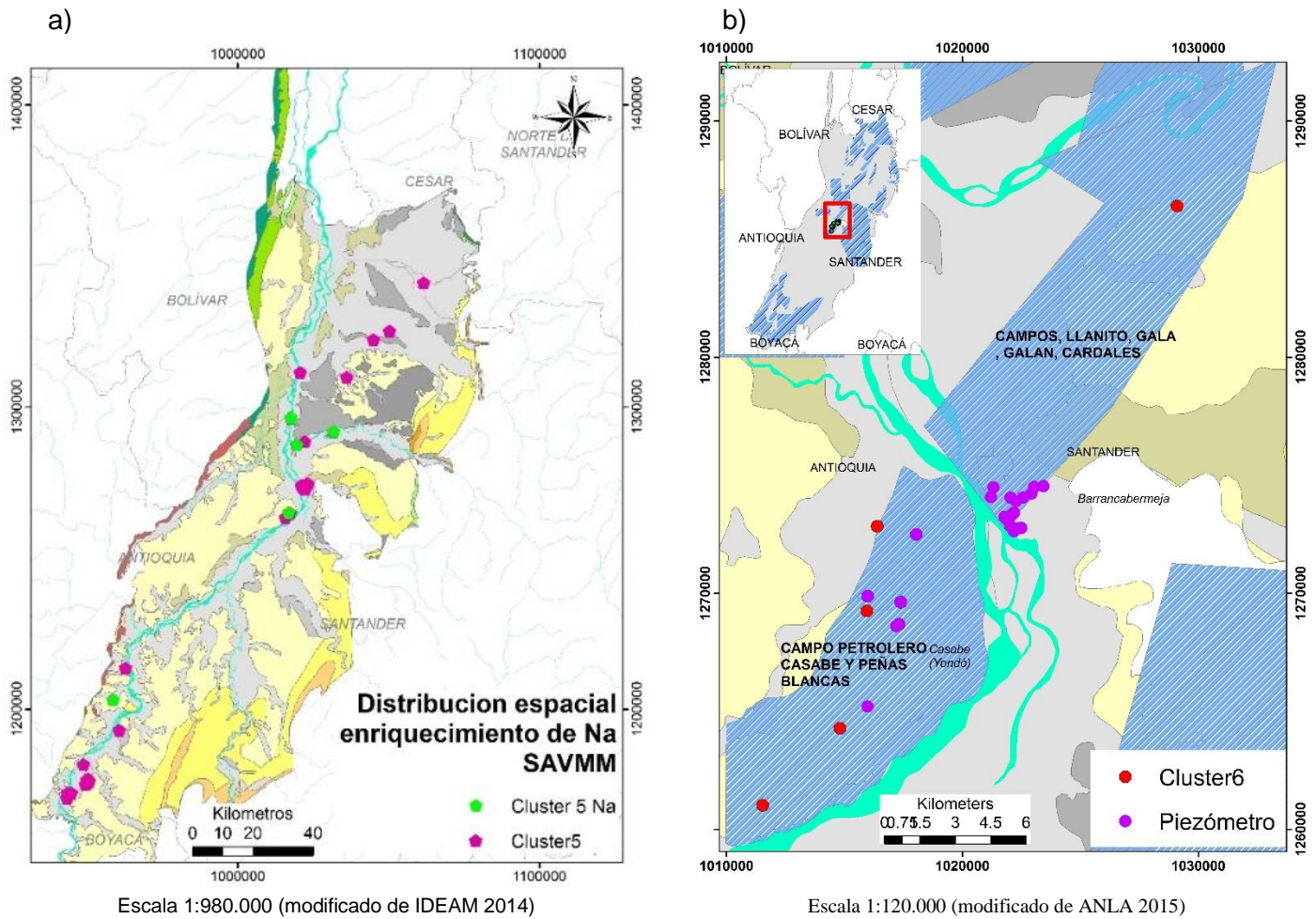
El comportamiento de los grupos generados a través del AAJ, tienen una tendencia importante en función de la profundidad. Estos resultados son validados a través del presente diagrama de dispersión. En este se puede identificar que las muestras del grupo 1 (menos mineralizadas y ubicadas a profundidades menores) están ubicadas al lado izquierdo de la gráfica, caso contrario las muestras de los grupos 5 y 6 (que obedecen a muestras más mineralizadas y ubicadas a mayores profanidades). En caso de las muestras ubicadas a menores profundidades, pero altamente mineralizadas, representan las muestras tomadas de los piezómetros y apoyan la hipótesis de contaminación antrópica por Cl⁻.

Figura 3-7. Proyección del resultado del Análisis de Agrupamiento Jerárquico en el diagrama de Gibbs



Proyección del resultado del Análisis de Agrupamiento Jerárquico en el diagrama de Gibbs respecto a su concentración de SDT en función de la relación $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$, se evidencia que las muestras de grupo 6 están fuera de los 3 dominios del diagrama, observaciones que apoyan la hipótesis de contaminación por Cl^- antropogénico.

Figura 3-8. Distribución espacial de los grupos 5 y 6.



a) Se resaltan las muestras con altos contenido de Na^+ que hacen que la geometría de este grupo sea atípica y b) Relación positiva en la ubicación de las muestras del grupo 6 y los piezómetros con registros altos de Cl^- , respecto a los campos petroleros Casabe y Llanito ubicados en el SAVMM.

Tabla 3-1. Estadística Descriptiva de los datos (las concentraciones de los iones analizados. Así como los de los SDT se expresan en mg/L el pH en sus unidades y la CE en $\mu\text{S/cm}$)

Parámetros	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	Varianza	Coefficiente de Variación	Asimetría	Asimetría Corregida
Ca ²⁺	12,9	5,6	0,1	67,9	15,6	244,8	121%	1,7	0,3
Cl ⁻	10,1	3,3	0,05	123,6	18,8	354,4	186%	4,1	2,3
Conductividad E.	312,1	256,6	10	1.120	260,9	68.075	91%	1,7	0,5
Fe total	7,1	0,6	0,05	151	20,9	435,9	294%	5,2	-2,8
HCO ₃ ⁻	74,5	39,2	1,2	350	92,3	8.517	124%	1,5	1,4
K ⁺	2,7	1,9	0,05	23	3,2	10,2	119%	3,6	-1
Mg ²⁺	4,0	1,8	0,05	22,1	4,7	22,1	118%	1,6	-1,5
Na ⁺	15,4	7,9	0,3	216	28,3	803,6	184%	5,0	0,2
NO ₃ ⁻	0,7	0,3	0,05	15,3	1,6	2,6	229%	6,2	2,1
pH	6,8	6,8	4,4	8,6	0,7	0,5	10%	0	0
SDT	144,7	111,5	6,5	728	130,2	1.695	90%	1,5	0,5
SO ₄ ²⁻	4,5	2,5	0,1	57,6	7,4	55,2	164%	4,6	-1

Tabla 3-2. Resultados del Análisis de Componentes Principales y varianza explicada

Parámetro	Componente		
	1	2	3
pH	0,43	-0,25	-0,46
Ca ²⁺	0,87	-0,04	-0,14
Na ⁺	0,75	0,25	-0,14
K ⁺	0,69	0,15	-0,05
Mg ²⁺	0,77	-0,01	0,13
Fe total	0,21	-0,54	0,52
Cl ⁻	0,49	0,07	0,60
SO ₄ ²⁻	0,16	0,70	-0,10
HCO ₃ ⁻	0,78	-0,25	-0,06
NO ₃ ⁻	0,04	0,44	0,51
Valor Propio	3,54	1,21	1,20
Varianza (%)	35,42	12,09	12,00
Var. Acumulada	35,42	47,51	59,51

En negrilla se resaltan las variables (parámetros) mejor representados por cada componente principal. Para el componente 1 el parámetro que mejor se representa es el Ca²⁺ (0,875) seguido de HCO₃⁻ (0,782) y Mg²⁺ (0,770) (**Figura 3-3**). El SO₄²⁻ (0,703) es el parámetro mejor representado en el componente 2 y el Cl⁻ (0,606) en el componente 3. Los valores negativos y positivos indican la posición del parámetro respecto al plano factorial conformado por los componentes principales 1 y 2 y plano factorial conformado por los componentes principales 1 y 3. Los valores cercanos a 1 indican que el parámetro está mejor representado en el componente principal.

Tabla 3-3. Características químicas promedio de cada grupo (las concentraciones de los iones analizados. Así como los de los SDT se expresan en mg/L el pH en sus unidades y la CE en $\mu\text{S/cm}$)

Parámetro	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6
Número de muestras	33	6	49	5	35	12
Ca ²⁺	2,2	4,2	5,9	12,5	31,6	20,8
Cl ⁻	3,5	6,4	5,8	15.	5,9	57,5
Conductividad E.	77	252,7	251,7	460,7	492,8	646,5
Fe total	5,2	0,05	2,8	1,7	4,7	42,6
HCO ₃ ⁻	15	36,3	34	55,9	178,1	127,6
K ⁺	0,6	1,8	2,5	4,1	3,9	5,2
Mg ²⁺	0,8	2,5	1,7	4,7	7,9	10,7
Na ⁺	1,9	14,9	12,4	18,8	32,2	14,8
NO ₃ ⁻	0,7	1	0,4	6,8	0,4	0,7
pH	6,4	7	6,7	6,7	7,1	6,9
SDT	45,2	109,9	152,2	277,3	365,2	485,1
SO ₄ ²⁻	2,6	12,4	4,1	12,1	5,2	1,6

4. Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

Este estudio se basó en la compilación de 2.207 caracterizaciones hidroquímicas dentro de las cuales se incluye muestras temporales (muestras recogidas en un período de tiempo diferente en el mismo lugar). La información se compiló y compartió en el sitio web de libre consulta HidroVisor ASVAM (Agua Subterránea del Valle Medio del Magdalena) >><https://sites.google.com/site/invhidrovm/ubicacion/home><<. La evaluación de la calidad de los datos recopilados indicó que solo el 6 % de las caracterizaciones recopiladas, 140 de 2.207, cumplían los estándares para ser empleadas en el análisis hidroquímico y estadístico multivariado. La distribución geográfica de las 140 muestras utilizadas limitó y redujo el área de estudio, lo que derivó en delimitar un sector más específico de la cuenca del VMM, e cual que correspondió al sistema acuífero del Valle Medio del Magdalena (SAVMM).

Se evidencio que, en las fases de: toma de muestras, análisis y reporte de laboratorio, análisis, procesamiento de los resultados, en el control y vigilancia de la información recibida por las autoridades ambientales, se presentan importantes problemas sistemáticos dado que, en primera instancia los laboratorios no están asegurando la calidad de la toma de las muestras y resultados de los análisis (resultados que no cumplen el balance iónico). A su vez las empresas consultoras (empresas que contratan la industria petrolera para la elaboración de los estudios de impacto ambiental), no revisan la información recibida por los laboratorios y solo anexan están información en los EIA`s sin mayor control y análisis de los resultados obtenidos. Terminando la cadena están las autoridades nacionales ambientales (quienes son las encargadas de licenciar la actividad petrolera en el país en función de la información recibida en los EIA`s y hacer seguimiento y control de la actividad a través de los ICA`s), se evidencio que tampoco hace una revisión minuciosa de la calidad de la información. Lo anterior pone en evidencia que la

caracterización fisicoquímica del agua subterránea está siendo solo parte de un trámite con el fin de obtener una licencia, más allá que la información levantada aporte a su principal objetivo el cual es aumentar el conocimiento que permita tomar mejores decisiones en pro de preservar la calidad del recurso hídrico subterráneo en las áreas donde se establecen proyectos de exploración y explotación de hidrocarburos.

El análisis hidroquímico del agua subterránea del SAVMM, a través del diagrama de Piper, identificó que la facie hidrogeoquímica bicarbonatada cálcica es el tipo de agua dominante a lo largo del área de estudio. Otros tipos de agua identificada es bicarbonatada y clorurada sódica, resultado de la disolución de silicatos y de las perturbaciones al sistema hidrogeológico a raíz de las actividades antrópicas que se desarrollan en el área de estudio. El resultado del análisis gráfico fue apoyado por un análisis estadístico multivariado, el cual incluyó un Análisis de Componentes Principales (ACP) y un Análisis de Agrupamiento Jerárquico (AAJ). Por medio del ACP se determinaron 3 componentes principales los cuales explican el 59,4 % de la varianza total en el conjunto de datos. Se encontró que el primer componente principal está relacionado con la mineralización del agua originada por procesos de disolución, el segundo con la atenuación natural de sulfatos y nitratos originado por procesos de óxido-reducción y el tercero por un posible aporte de cloruro antropogénico derivado de la actividad hidrocarburífera. El AAJ permitió clasificar las 140 muestras en seis grupos de acuerdo con su similitud. La definición de los grupos sigue de cerca la clasificación por tipo de agua. El grupo 1 corresponde al agua recién infiltrada en áreas de recarga, el agua tiene pocos iones en solución y corresponde a las muestras del tipo bicarbonatadas cálcicas. El grupo 5 es el agua más mineralizada tipo bicarbonatada sódica y responde a agua subterránea más evolucionada dado que representa estratos más profundos a lo largo del área de estudio. Los grupos 2, 3 y 4 podrían corresponder a agua subterránea mixta o intermedia entre el grupo 1 y 5. Por otro lado, la geoquímica del grupo 6 es atípica, lo cual es explicado por un aporte de cloruro de origen antropogénico.

En este estudio se identificaron los principales procesos geoquímicos que determinan la composición y calidad del agua subterránea ubicada en el SAVMM: *Recarga*- infiltración de agua meteórica, *Disolución* - interacción del agua con silicatos, *Oxido-Reducción* – atenuación natural dado por la presencia de un ambiente reductor, y *Alteración*

Antropogénica – contaminación por el desarrollo de actividades antrópicas que se realizan en la región.

4.2 Recomendaciones

Los resultados de este estudio demuestran claramente que el uso de métodos gráficos apoyados por la estadística multivariada son de gran utilidad para clasificar un gran número de muestras basadas en sus parámetros químicos, con el fin de comprender con más detalle la hidrogeoquímica del área de estudio [Güler et al., 2002]. Sin embargo, debido a la heterogeneidad química, la escala de trabajo, la fuente y tipo de información, y la no ubicación de las caracterizaciones utilizadas para esta investigación, la situación debe ser investigada con mayor detalle, con un mejor conocimiento de las condiciones hidrogeológicas, que permitan una mejor caracterización e interpretación de la química del agua subterránea. Investigaciones con datos fisicoquímicos obtenidos a partir de información primaria podrían permitir una mejor comprensión de los procesos geoquímicos aquí identificados.

Por último, el uso de las técnicas para evaluar los procesos geoquímicos y la química del agua subterránea requiere que los datos a ser utilizados tengan una alta calidad, existan en cantidad y sean representativos del sistema a evaluar, por ello, es manifiesta la dificultad de emplear este tipo de herramientas en Colombia. Es necesario que las investigaciones futuras se realicen con información primaria y la toma, transporte, almacenamiento y análisis de las muestras sigan los estándares construidos para tal fin y las autoridades ambientales nacionales y regionales aumenten esfuerzos a la hora de evaluar la información que es recibida en el marco del proceso de licenciamiento ambiental.

Bibliografía

1. (2007), RESOLUCIÓN, in 2115, edited, p. 23, MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, Colombia.
2. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, y M. Smith (1998), *Crop evapotranspiration —guidelines for computing crop water requirements.*, FAO Irrigation and drainage
3. ANH, A. N. d. H. (2007), Colombian Sedimentary Basins *Rep.* 978-958-98237-0-5, 92 pp.
4. ANH, A. N. d. H. (2011), Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal *Rep.*, 92 pp.
5. ANH, A. N. d. H. (2012), CUENCA VALLE MEDIO DEL MAGDALENA "Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos" *Rep.*, 82 pp.
6. ANLA, A. N. d. L. A.-. (2015), POR LA CUAL SE MODIFICA EL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL ESTABLECIDO MEDIANTE LA RESOLUCIÓN 0702 DEL 25 DE JULIO DE 2002 Y SE TOMAN OTRAS DETERMINACIONES, in 0772, edited, p. 198, Colombia.
7. Arismendy, R. D., J. F. Salazar, M. V. Vélez, y H. A. Caballero (2003), Evaluación del potencial acuífero de los municipios de Puerto Berrío y Puerto Nare Departamento de Antioquia., 19.
8. ATG, A. T. G. (2015), INFORME ETAPA II REVISIÓN DE INFORMACIÓN EXISTENTE *Rep.*, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
9. Blake, S., T. Henry, J. Murray, R. Flood, M. R. Muller, A. G. Jones, y V. Rath (2016), Compositional multivariate statistical analysis of thermal groundwater provenance: A hydrogeochemical case study from Ireland, *Applied Geochemistry*, 75, 171-188.
10. Canavos, G. C. (1987), *Probabilidad y estadística*, 668 pp., Mexico
11. Clavijo, J. (1996), Memoria Explicativa Mapa geológico de Colombia, Plancha 75 Aguachica *Rep.*, Ingeominas.
12. Cloutier, V., R. Lefebvre, R. Therrien, y M. M. Savard (2008), Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system, *Journal of Hydrology*, 353(3-4), 294-313.
13. Cooper, M. A. (1995), Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia, *AAPG*, 79(10), 1421-1442.

14. CORANTIOQUIA (2008), El recurso hídrico en la jurisdicción de Corantioquia 1995-2007 *Rep.*, 106 pp.
15. Costa, D., J. Jesus, D. Branco, A. Danko, y A. Fiuza (2017), Extensive review of shale gas environmental impacts from scientific literature (2010-2015), *Environ Sci Pollut Res Int.*
16. Custodio, E., y M. R. Llamas (2001), *Hidrología Subterránea*, Omega.
17. Chou, W. R., L. S. Fang, W. H. Wang, y K. S. Tew (2012), Environmental influence on coastal phytoplankton and zooplankton diversity: a multivariate statistical model analysis, *Environ Monit Assess*, 184(9), 5679-5688.
18. Darraha, T. H., A. Vengosha, R. B. Jackson, N. R. Warner, y R. J. Poreda (2014), Noble gases identify the mechanisms of fugitive gas contamination in drinking-water wells overlying the Marcellus and Barnett Shales, *Proc Natl Acad Sci U S A*, 111, 14076–14081.
19. Davis, J. C. (2002), *Statistics and Data Analysis in Geology* 656 pp., Wiley.
20. Deutsch, W. J., y R. Siegel (1997), *Groundwater Geochemistry: Fundamentals and Applications to Contamination*, 232 pp., CRC Press.
21. DNP (2014), Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 *Rep.*
22. Domenico, P. A., y F. W. Schwartz (1998), *Physical and Chemical Hydrogeology*, 528 pp., Wiley.
23. Everitt, B. S., S. Landau, M. Leese, y D. Stahl (2011), *Cluster Analysis*, 346 pp.
24. Fagundo, J. R., y H. P. González (2005), *HIDROGEOQUÍMICA*, 314 pp., Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional (CENAMENT).
25. Farnham, I., A. Singh, K. Stetzenbach, y K. Johannesson (2002), Treatment of nondetects in multivariate analysis of groundwater geochemistry data, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 60(1-2), 265– 281.
26. Farnham, I., K. H. Johannesson, A. K. Singh, V. F. Hodge, y K. J. Stetzenbach (2003), Factor analytical approaches for evaluating groundwater trace element chemistry data, *Analytica Chimica Acta*, 490(1-2), 123-138.
27. Feininger, T. (1972), *Geología de parte de los departamentos de Antioquia y Caldas (sub-zona II-B)*.
28. Freeze, R. A., y J. A. Cherry (1979), *Groundwater*.
29. Ghesquière, O., J. Walter, R. Chesnaux, y A. Rouleau (2015), Scenarios of groundwater chemical evolution in a region of the Canadian Shield based on multivariate statistical analysis, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 246-266.
30. Gibbs, R. J. (1970), Mechanisms controlling world water chemistry, *Science*, 170, 1088-1090.
31. Gimenez-Forcada, E., M. Vega-Alegre, y S. Timon-Sanchez (2017), Characterization of regional cold-hydrothermal inflows enriched in arsenic and associated trace-elements in the southern part of the Duero Basin (Spain), by multivariate statistical analysis, *Sci Total Environ*, 593-594, 211-226.

32. Gomez, E. (2001), *Tectonic Control on the Late Cretaceous to Cenozoic Sedimentary Fill of the Middle Magdalena Valley Basin, Eastern Cordillera And Llanos Basin.*, Disertación para optar al título de Doctor en Filosofía, Cornell University.
33. Gong, F., B.-T. Wang, Y.-S. Fung, y F.-T. Chau (2005), Chemometric characterization of the quality of the atmospheric environment in Hong Kong, *Atmospheric Environment*, 39(34), 6388-6397.
34. Gonzalez, A. (1992), *Memoria explicativa de la plancha de la plancha 106 Liberia escala 1:100000*, INGEOMINAS, Bogotá.
35. Güler, C., G. D. Thyne, J. E. McCray, y K. A. Turner (2002), Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data, *Hydrogeology Journal*, 10(4), 455-474.
36. Hounslow, A. W. (1995), *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*, 416 pp., Lewis Publishers, New York.
37. Husson, F., J. Josse, y S. Lé (2008), FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis, *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1-18.
38. IDEAM (2013a), Aguas Subterráneas en Colombia: una Visión General *Rep.* 978-958-8067-60-5, 284 pp.
39. IDEAM (2013b), Zonificación y codificación de uniades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia *Rep.*, 47 pp, Bogotá, D. C.
40. IDEAM (2014a), Estudio Nacional del Agua *Rep.* 978-958-8067-70-4, 496 pp.
41. IDEAM (2014b), Sistemas Acuíferos de Colombia Anexo 4 ENA 2014 *Rep.*
42. IDEAM (2016), Registros Hidrometeorológicos mensuales, edited, IDEAM.
43. INGEOMINAS (2002a), Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia *Rep.*
44. INGEOMINAS (2002b), Informe Técnico. Recopilación de Información Hidrogeológica para el Atlas de Aguas Subterráneas. Plancha 5-06. *Rep.*, 51 pp.
45. INGEOMINAS (2003), ATLAS DE AGUAS SUBTERRANEAS DE COLOMBIA EN ESCALA 1:500.000 *Rep.*, 145 pp.
46. James, G., D. Witten, T. Hastie, y R. Tibshirani (2016), *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R*, Springer
47. Kim, K.-H., S.-T. Yun, B.-Y. Choi, G.-T. Chae, Y. Joo, K. Kim, y H.-S. Kim (2009), Hydrochemical and multivariate statistical interpretations of spatial controls of nitrate concentrations in a shallow alluvial aquifer around oxbow lakes (Osong area, central Korea), *J Contam Hydrol*, 107(3-4), 114-127.
48. Lang, S. (1990), *Introducción al Algebra Lineal* 274 pp., ADDISON-WESLEY IBEROAMERICANA.
49. Lebart, L., M. Piron, y A. Morineau (1995), *Statistique exploratoire multidimensionnelle*, 456 pp., DUNOD.
50. Matiatos, I., A. Alexopoulos, y A. Godelitsas (2014), Multivariate statistical analysis of the hydrogeochemical and isotopic composition of the groundwater resources in northeastern Peloponnesus (Greece), *Sci Total Environ*, 476-477, 577-590.

51. McCourt, W. J. (1984), The Geology of the Central Cordillera in the Department of Valle del Cauca, Quindío and NW Tolima *Rep.*, 8-49 pp, British Geological Survey Report V.
52. Melloul, A., y M. Collin (1992), The 'principal components' statistical method as a complementary approach to geochemical methods in water quality factor identification; application to the Coastal Plain aquifer of Israel, *Journal of Hydrology*, 140(1-4), 49-73.
53. Montcoudiol, N., J. Molson, y J. M. Lemieux (2014), Groundwater geochemistry of the Outaouais Region (Québec, Canada): a regional-scale study, *Hydrogeology Journal*, 23(2), 377-396.
54. Montgomery, S. (1992), Petroleum Potential Of Upper Magdalena Valley. *Rep.*, Petroleum Information Corporation.
55. Mora, a., y J. Rizzi (2004), *Regional Prospectivity Evaluation*, Reporte interno PETROBRAS, Bogotá.
56. Morales, L. (1958), General geology and oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia, in *AAPG Oil Symposium*, edited.
57. Morales, L. (1958), *General geology and oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia*, AAPG Oil Symposium.
58. Noshadi, M., y A. Ghafourian (2016), Groundwater quality analysis using multivariate statistical techniques (case study: Fars province, Iran), *Environ Monit Assess*, 188(7), 419.
59. Osborn, S. G., A. Vengosh, N. R. Warner, y R. B. Jackson (2011), Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing, *Proc Natl Acad Sci U S A*, 108(20), 8172-8176.
60. Paquette, S. M., L. J. Molofsky, J. A. Connor, K. L. Walker, H. Hopkins, y A. Chakraborty (2017), A Tiered Approach to Evaluating Salinity Sources in Water at Oil and Gas Production Sites, *Ground Water*.
61. Peeters, L. (2014), A background color scheme for piper plots to spatially visualize hydrochemical patterns, *Ground Water*, 52(1), 2-6.
62. Piper, A. M. (1944), A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses, *American Geophysical Union*, 26(6), 914-928.
63. Porta, J. D. (1974), *Lexique Stratigraphique International. Volume V*, Centre National de la Recherche Scientifique, Paris.
64. R Development Core Team (2011), A Language and Environment for Statistical Computing, in *the R Foundation for Statistical Computing*, edited.
65. Serna, E. (1986), Mapa de terrenos geológicos de Colombia. Bogotá: Publicaciones *Rep.*, Especial del Ingeominas.
66. Simler, R. (2013), DIAGRAMMES: Logiciel d'hydrochimie multilangage en distribution libre, edited.
67. Steinhorst, K. R., y R. E. Williams (1985), Discrimination of Groundwater Sources Using Cluster Analysis, MANOVA, Canonical Analysis and Discriminant Analysis, *Water Resources Researc*, 21(8), 1149-1156.
68. Stiff, H. A. (1951), The Interpretation of Chemical Water Analysis by Means of Patterns, *Society of Petroleum Engineers*, 3(10).

69. Taborda, B. (1965), , *Geology of the Mares Concesión: Colombian Society of Petroleum Geologist and Geophysicists*, Fieldtrip Guide.
70. Tikhomirov, V. V. (2016), *Hydrogeochemistry Fundamentals and Advances*, Wiley, 1, 336.
71. U.S.EPA (2016), *Hydraulic Fracturing for Oil and Gas: Impacts from the Hydraulic Fracturing Water Cycle on Drinking Water Resources in the United States Rep.*, 666 pp.
72. Villegas, P., V. Paredes, T. Betancur, y L. Ribeiro (2013), Assessing the hydrochemistry of the Urabá Aquifer, Colombia by principal component analysis, *Journal of Geochemical Exploration*, 134, 120-129.